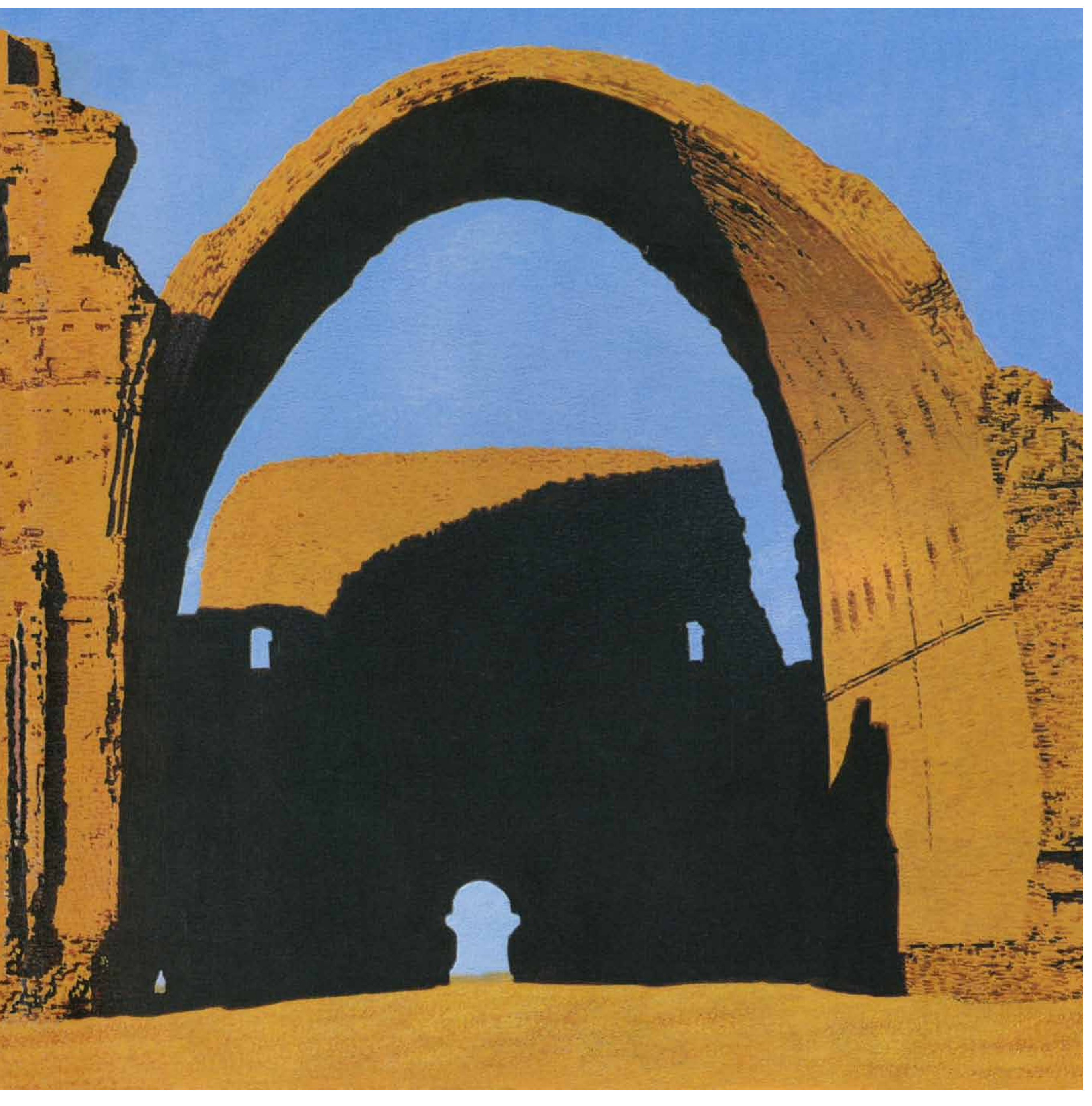
INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición en español de **SCIENTIFIC AMERICAN**



BOVEDAS CLASICAS DE PROXIMO ORIENTE

Septiembre 1987

450 PTAS.
(IVA INCLUIDO)

Copyright © 1987 Prensa Científica S.A.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Número 132
Septiembre 1987



INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
DIRECTOR EDITORIAL José María Valderas Gallardo
REDACCION Carlos Oppenheimer, José María Farré Josa
PRODUCCION César Redondo Zayas
PROMOCION EXTERIOR Pedro Clotas Cierco
EDITA Prensa Científica, S.A. Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona (ESPAÑA)

SCIENTIFIC AMERICAN

DIRECTOR EDITORIAL Jonathan Piel
REDACCION Armand Schwab, Jr. (Subdirector), Timothy Appenzeller, John M. Benditt, David L. Cooke, Jr., Ari W. Epstein, Gregory R. Greenwell, John Horgan, Robert Kunzig, James T. Rogers, Ricki L. Rusting, Karen Wright
DIRECTOR ARTISTICO Samuel L. Howard
DIRECTOR DE PRODUCCION Richard Sasso
PRESIDENTE HONORARIO Gerard Piel

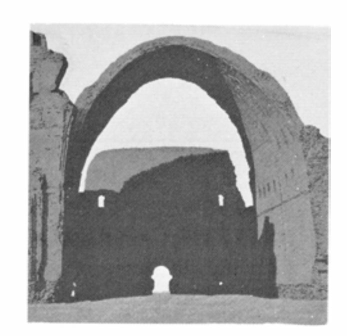
Colaboradores de este número:

Asesoramiento y traducción:

Juan L. Serra: *Moléculas de excitación visual*; Manuel Puigcerver: *Los anillos de Urano*; María Birulés: *El perfume*; Isabel García Acha y J. Rodríguez Villanueva: *La enfermedad de Lyme*; Amando García: *Fusión nuclear fría*; Manuel Crespo: *Aerodinámica de la polinización eólica*; Leonor Vernet: *Arcos y bóvedas del Próximo Oriente*; Luis Bou: *Juegos de ordenador*; J. Vilardell: *Taller y laboratorio.*

Libros:

F. G. Valdecasas, L. Alonso, J. M. Comelles y J. Terradas



PORTADA

En la portada aparecen las ruinas del Taq Kisra, un gran salón de audiencias del palacio de Ctesifon, al sur de Bagdad, construido por el pueblo persa de los sasánidas entre los siglos tercero y sexto d. de C. La bóveda de ladrillo sin soporte de mayor longitud del mundo techa la estancia. El tramo de la bóveda es de 25,5 metros y tiene 28,4 metros de altura. Esta bóveda constituye el mejor ejemplo de la aplicación en el Próximo Oriente de una técnica arquitectónica para la construcción de bóvedas de ladrillo que no hace uso de soportes. (Véase "Arcos y bóvedas del Próximo Oriente", por Gus W. Van Beek, en este mismo número.) A diferencia de la mayoría de arcos y bóvedas levantados en el Próximo Oriente, Taq Kisra se construyó con ladrillos en vez de adobes.

Suscripciones:
Prensa Científica, S. A.
Calabria, 235-239
08029 Barcelona (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 33-37

Condiciones de suscripción:
España:
Un año (12 números):
4950 pesetas (IVA incluido)
Extranjero:
Un año (12 números): 35 U.S. $
Ejemplar atrasado ordinario:
450 pesetas (IVA incluido)
Ejemplar atrasado extraordinario:
575 pesetas (IVA incluido)

Distribución para España:
Distribuciones de Enlace, S. A.
Bruch, 49 - 08009 Barcelona

Distribución para los restantes países:
Editorial Labor, S. A.
Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona

Publicidad:
Madrid:
Gustavo Martínez Ovin
O'Donnell, 18, 4.º J - 28009 Madrid
Teléfonos 275 88 85 - 275 90 85
Cataluña:
Paulino Muñoz Victoria
Muntaner, 467-469, 3.º, 3.ª
08021 Barcelona
Teléfono 211 92 45

Controlado por O.J.D.

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Pintura de la portada de Marvin Mattelson

Página	Fuente
9-10	J. A. Campos-Ortega, F. Jiménez y Ricardo Génova
11	J. A. Campos-Ortega y F. Jiménez (*arriba*); Ricardo Génova (*abajo*)
12	Gerhard Technau
13-15	J. A. Campos-Ortega y F. Jiménez
16	Ursula Dietrich
17	H. Vässin
19	Lubert Stryer
20	Tom Prentiss
21-26	George V. Kelvin, Science Graphics
29-30	Jet Propulsion Laboratory
31	George Retseck
32	Jet Propulsion Laboratory
33	Mark Showalter y Maren Cooke, Ames Research Center (*arriba*); George Retseck (*abajo*)
34-35	George Retseck
39	Roure-Bertrand-Dupont
40	Documento PLS
41	Roure-Bertrand-Dupont, PLS y P. Horber
42	Documento PLS
43	Roure-Bertrand-Dupont, PLS y P. Horber
44	Sociedad Técnica de Perfumistas de Francia
46	Documento PLS
48	Roure-Bertrand-Dupont, PLS y P. Horber
53	Samuel L. Howard
54-55	Tom Prentiss
56	Stanley F. Hayes, Willy Burgdorfer y M. D. Corwin, Laboratorios de las Montañas Rocosas (*arriba*); Departamento estatal de Sanidad de Nueva York (*abajo*)
57	Sally Black
61	Laboratorio Nacional de Ingeniería de Idaho
62-65	George Retseck
69	Karl J. Niklas
70	Patricia J. Wynne
71	Karl J. Niklas (*arriba*), Patricia J. Wynne (*abajo*)
72	Patricia J. Wynne (*izquierda*), Karl J. Niklas (*derecha*)
73	Karl J. Niklas
77	Gus W. Van Beek
78-80	Alan D. Iselin
81	Alan D. Iselin (*arriba, a la izquierda, y abajo*), David B. Stronach (*abajo, a la derecha*)
82	Gus W. Van Beek
83	Paul Logsdon
87	James P. Crutchfield
88	Edward Bell (*arriba*), Gordon Hughes (*abajo*)
89	Gordon Hughes
93-95	Michael Goodman

ISSN 0210-136X — Dep. legal: B. 38.999-76
Fotocomposición Tecfa, S.A.
Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona
Fotocromos reproducidos por
Reprostudy, S.A.
Gráfica Elzeviriana, S.A.
Nápoles, 249 - Tel. 207 40 11
08013 Barcelona
Printed in Spain - Impreso en España

Copyright © 1987 Scientific American Inc., 415 Madison Av., New York N. Y. 10017.
Copyright © 1987 Prensa Científica, S. A. Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona (España)

Reservados todos los derechos. Prohibida la reproducción en todo o en parte por ningún medio mecánico, fotográfico o electrónico, así como cualquier clase de copia, reproducción, registro o transmisión para uso público o privado, sin la previa autorización escrita del editor de la revista.

El nombre y la marca comercial SCIENTIFIC AMERICAN, así como el logotipo distintivo correspondiente, son propiedad exclusiva de Scientific American, Inc., con cuya licencia se utilizan aquí.

Los autores

JOSE A. CAMPOS-ORTEGA y FERNANDO JIMENEZ ("Bases de la neurogénesis en *Drosophila melanogaster*") son neurobiólogos. Campos-Ortega dirige actualmente el Institut für Entwicklungsphysiologie de la Universidad de Colonia (Alemania Federal). Cursó estudios de medicina en la Universidad de Valencia, disciplina en la que se doctoró por las universidades de Valencia (1966) y Göttingen (1968). Fue profesor titular de neurobiología en la Universidad de Friburgo antes de trasladarse a Colonia en 1982. Jiménez es colaborador científico del Consejo de Investigaciones Científicas (CSIC). Se doctoró en ciencias biológicas por la Universidad Complutense de Madrid en 1976, y se incorporó en 1977 al grupo de Campos-Ortega en Friburgo. Ambos han trabajado juntos sobre el desarrollo del sistema nervioso de *Drosophila* durante los últimos ocho años. Jiménez prosigue sus trabajos de investigación en el Centro de Biología Molecular (CSIC-Universidad Autónoma de Madrid).

LUBERT STRYER ("Moléculas de excitación visual") ocupa la cátedra Winzer de biología celular de la Facultad de Medicina de la Universidad de Stanford. Diplomado en ciencias por la Universidad de Chicago en 1957 y licenciado en medicina por la facultad correspondiente de la Universidad de Harvard en 1961, disfrutó los tres cursos siguientes de una beca Helen Hay Whitney de investigación, que en parte dedicó a colaborar en el Laboratorio de Biología Molecular que el Consejo británico de Investigaciones Médicas tiene en Cambridge. Enseñó bioquímica en Stanford entre 1963 y 1969, en la Universidad de Yale, retornando a Stanford en 1976. Es miembro de la Academia Nacional estadounidense de Ciencias.

JEFFREY N. CUZZI y LARRY W. ESPOSITO ("Los anillos de Urano") comparten su fascinación por la estructura y dinámica de los anillos planetarios. Cuzzi es miembro del equipo de obtención de imágenes del *Voyager*, del Centro Ames de Investigación, de la NASA. Cursó estudios en la Universidad de Cornell y se doctoró en 1973 por el Instituto de Tecnología de California. Enseñó durante un curso en la Universidad de Massachusetts en Amherst y, desde 1974 hasta 1976, trabajó para el Consejo Nacional estadounidense de Investigaciones. En 1978, tras dos años de permanencia en el Laboratorio de Ciencias Espaciales de la Universidad de California en Berkeley, Cuzzi se trasladó a Ames. Esposito se licenció en ciencias por el Instituto de Tecnología de Massachusetts, en 1973, y empezó a colaborar con Cuzzi durante la redacción de su tesis doctoral, que defendió en la Universidad de Massachusetts en Amherst, en 1977. Desde entonces se encuentra en el deparamento de ciencias astrofísicas, planetarias y atmosféricas de la Universidad de Colorado en Boulder, habiendo dedicado la mayor parte de su trabajo a la misión Voyager.

MARTINE SEU-SALERNO y JOHN BLAKEWAY ("El perfume") trabajan para la compañía Roure-Bertrand-Dupont de Argenteuil, Francia. Seu-Salerno se licenció en farmacia por la Universidad de París XI en 1976, tras cursar el primer ciclo de carrera en el Instituto de Farmacia Industrial de París. Sus trabajos se centran en el estudio de las propiedades de los perfumes: olorosas, antimicrobianas, de difusión, reactivas, etcétera. Blakeway estudió química en la Universidad de Manchester, doctorándose en 1948. Ha sido director de investigación de Colgate-Palmolive, más tarde de Chesebrough-Ponds y también director científico del octavo congreso de la Federación Internacional de Sociedades de Químicos Cosméticos. En 1972 se le nombró redactor jefe del *International Journal of Cosmetic Science* y, desde 1975, dirige el laboratorio de investigación aplicada de su compañía.

GAIL S. HABICHT, GREGORY BECK y JORGE L. BENACH ("La enfermedad de Lyme") están adscritos al departamento de patología de la Universidad estatal de Nueva York en Stony Brook. Habicht, profesora asociada de ese centro, se doctoró por la Universidad de Stanford en 1965. Posteriormente, hasta 1971, colaboró con la Universidad de Rockefeller y la Clínica y Fundación de Investigación Scripps; ese mismo año se trasladó a Stony Brook. Beck cursó el primer ciclo universitario de ciencias en SUNY en Albany. Antes de ocupar su actual plaza de investigador de Stony Brook trabajó en el Hospital de Veteranos de Northport, Nueva York. Benach es investigador del Departamento estatal de Sanidad de Nueva York y profesor asociado de patología de Stony Brook. Sus investigaciones se centran en las enfermedades de transmisión por ácaros. Procede de la Universidad de Rutgers.

JOHANN RAFELSKI y STEVEN E. JONES ("Fusión nuclear fría") se conocieron en 1983, en el Centro Europeo de Investigaciones Nucleares (CERN). Rafelski, doctor por la Universidad de Frankfurt en 1973, trabajó en la Universidad de Pennsylvania y el Laboratorio Nacional estadounidense Argonne. Colabora con el CERN desde 1977, ocupación que ha compartido con la docencia de física en la Universidad de Frankfurt (entre 1979 y 1983) y en la Universidad de Ciudad el Cabo, hasta este mismo verano. Jones enseña física y astronomía en la Universidad Brigham Young, por la que se licenció en ciencias en 1973. En 1978 se recibió de doctor por la de Vanderbilt. Tras un año de trabajos de postdoctorado en la Universidad de Cornell y en las instalaciones de estudio de los mesones de Los Alamos (LAMPF), investigó sobre la fusión en el Laboratorio Nacional de Ingeniería de Idaho. En 1985 se trasladó a Brigham Young.

KARL J. NIKLAS ("Aerodinámica de la polinización eólica") estudia las propiedades biomecánicas de los vegetales y enseña botánica en la Universidad de Cornell. Cursó biología y matemáticas en el City College de la Universidad municipal de Nueva York, doctorándose en 1974 por la de Illinois en Urbana-Champaign. Estudió, con una beca Fulbright-Hayes, en la Universidad de Londres y, en 1975, se le nombró conservador del Jardín Botánico de Nueva York. En 1978 se trasladó a Cornell.

GUS W. VAN BEEK ("Arcos y bóvedas del Próximo Oriente") ha sido conservador de arqueología del Viejo Mundo de la Institución Smithsoniana desde 1967 y ha dirigido 11 campañas en el yacimiento de Tell Jemmeth, Israel. Cursó estudios en la Universidad de Tulsa, en el Seminario de Teología McCormick y en la Universidad Johns Hopkins, que le recibió de doctor en 1953. Durante seis años trabajó en ese último centro, en el Proyecto de Publicación Arabe, trasladándose después (1959) a la Institución Smithsoniana. Está preparando una obra sobre la construcción con adobes secados al sol.

Hace...

José M.ª López Piñero

...cien años

José Ribera Sans publicó su libro *Estudios clínicos de Cirugía infantil*, hito inicial de esta especialidad en España. Nacido en la localidad tarraconense de Tivisa, Ribera estudió el bachillerato en Reus, donde entabló duradera amistad con sus condiscípulos Antonio Gaudí y Eduard Toda Güell, más tarde destacadas personalidades de la cultura catalana. El fallecimiento de sus padres motivó que, en 1867, se trasladase a vivir junto a un tío suyo que residía en Almería. Desde 1870 hasta 1876 estudió medicina en la Facultad de Granada, donde fue alumno interno en el servicio quirúrgico de Juan Creus Manso. El magisterio de Creus influyó de manera directa, no solamente en su decisión de consagrarse a la cirugía, sino en la orientación posterior de su actividad profesional y científica.

Al terminar sus estudios, Ribera marchó a Madrid, en cuya Facultad de Medicina obtuvo el título de doctor en 1877. El año siguiente, ganó por oposición la plaza de médico de guardia del Hospital del Niño Jesús, primer hospital infantil español que acababa de ser fundado y que dirigía Mariano Benavente. Pronto pasó a médico titular encargado de la sección de cirugía y, tras el fallecimiento de Benavente en 1885, fue nombrado director facultativo. En este hospital realizó la mayor parte de su obra. Allí tuvo que adaptar las posibilidades de la nueva era quirúrgica poslisteriana a las especiales condiciones de los niños. De esta forma, se convirtió en el iniciador de la cirugía infantil en España y en uno de sus más tempranos cultivadores europeos.

En 1888 ganó por oposición la cátedra de clínica quirúrgica de la Facultad de Medicina de Madrid. Desde ella contribuyó a elevar el nivel científico de la cirugía española, impartiendo una enseñanza digna y promoviendo una modesta actividad investigadora, hasta su muerte en 1912.

Además de ser un operador de amplísima experiencia y gran destreza, aportó a la técnica quirúrgica numerosos procedimientos originales. Buena parte corresponden a la cirugía del aparato locomotor, en especial al capítulo de las desarticulaciones. Fue el primero que aplicó, en las desarticulaciones coxofemorales, el método hemostático de la compresión elástica de la aorta, años antes que Fritz August Momburg lo difundiera en obstetricia. Como cirujano infantil, entre otras contribuciones de menor relieve, mejoró las técnicas para el tratamiento de la espina bífida. También ideó procedimientos nuevos para la extirpación de los pólipos nasofaríngeos y para diversas intervenciones en el tórax y el aparato digestivo.

Ribera fue autor de una obra escrita extraordinariamente cuantiosa. Desde 1886 hasta su muerte colaboró como redactor en la *Revista de Medicina y Cirugía Prácticas*, encargándose de la sección titulada "Revista de Cirugía" y de la mayor parte de las reseñas de libros de tema quirúrgico. Además, publicó en esta revista treinta y ocho trabajos originales. Redactó también varios capítulos y abundantes notas adicionales con destino a las ediciones en castellano –dirigidas por Creus– de dos de los tratados quirúrgicos más importantes de la época: el británico de John Eric Erichsen y el norteamericano de John Ashhurst.

Participó de forma muy intensa en las actividades de la Academia Médico-Quirúrgica de Madrid y de la Real Academia de Medicina. Entre las memorias que presentó a la primera sobresalen las dedicadas al diagnóstico diferencial de los tumores abdominales y tratamiento de los hidroceles, ambas publicadas por la *Revista de Medicina y Cirugía Prácticas* en 1883. Entre los discursos, memorias e informes que presentó a la segunda se encuentran dos de sus mejores estudios: los consagrados a la repercusión general de las lesiones quirúrgicas (1886) y a la laparotomía (1894).

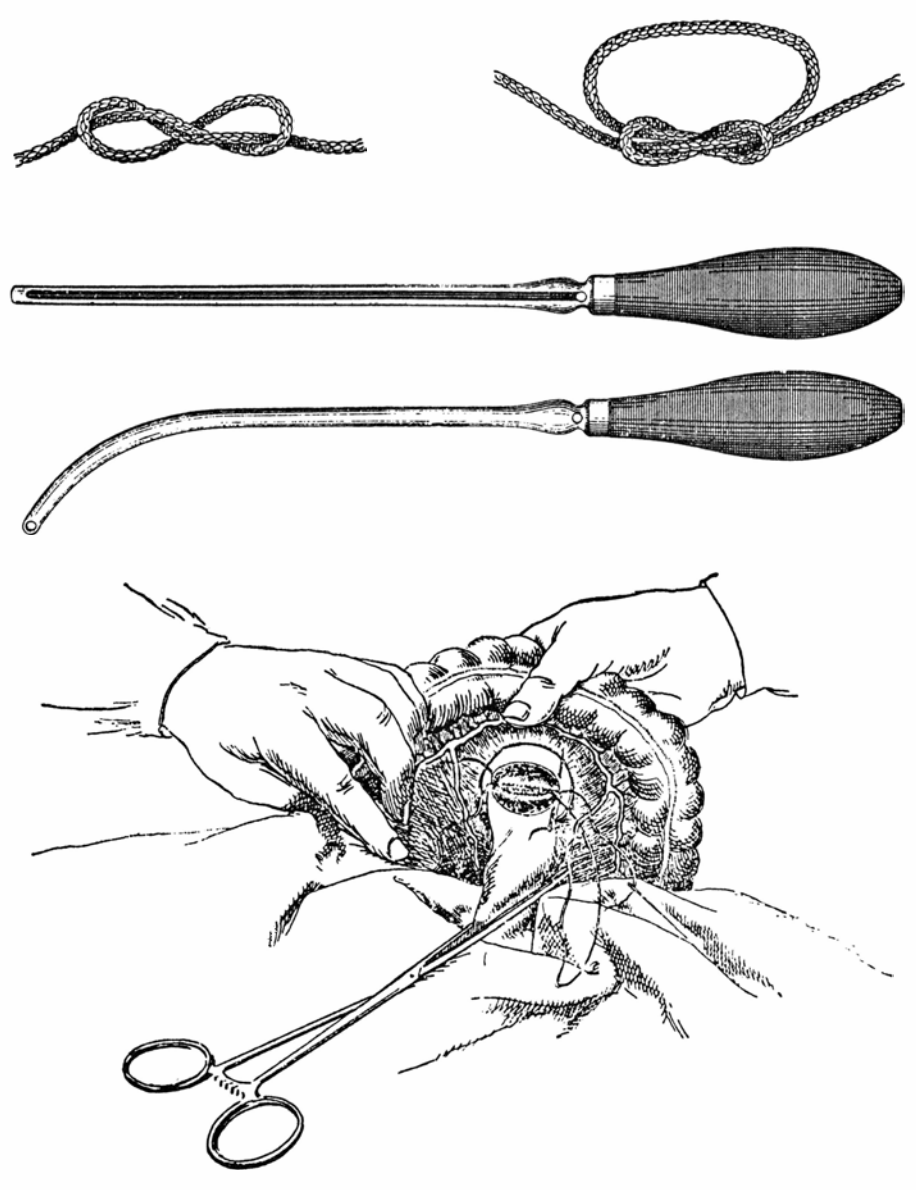
La función de los congresos como medios de comunicación científica interesó de modo especial a Ribera, que fue uno de los primeros cirujanos españoles que asistió de forma regular a reuniones médicas internacionales y nacionales. Redactó cerca de medio centenar de ponencias y comunicaciones, de las que son ejemplos destacados las relativas a muertes postoperatorias y tuberculosis quirúrgica, presentadas al XIV Congreso Internacional de Medicina (1903), y la conferencia sobre la "desarticulación interileo-abdominal" que pronunció en el XXIV Congreso de la Asociación Francesa de Cirugía (1911), poco antes de su muerte.

Por otra parte, recogió en el libro *Estudios clínicos de Cirugía infantil* (1887) sus principales trabajos sobre el tema. Publicó asimismo dos voluminosos manuales didácticos de clínica quirúrgica general (1895) y de patología quirúrgica general (1900). Dejó inédita una obra, en la que intentó recapitular de modo sistemático sus aportaciones originales e integrarlas en la tradición de la escuela de Creus y de Diego de Argumosa, maestro del propio Creus. Fue impresa en 1916 con el título de *Estudios monográficos de Cirugía española*. Reproducimos a continuación un fragmento del capítulo en el que resumió sus contribuciones a la hemostasia en la desarticulación coxofemoral, quizás el aspecto de su producción de más duradero prestigio:

"Mis primeras desarticulaciones de cadera, y mis primeras publicaciones referentes a la misma, datan ya de larga fecha.

"En la *Revista de Medicina y Cirugía Prácticas*, de Madrid (núm. 369, noviembre de 1891), publiqué los dos primeros casos de desarticulación de cadera, hecha en muñones de amputación. Decía entonces, haciendo algunas consideraciones referentes a dicha operación, que los peligros de la desarticulación coxo-femoral son la hemorragia, sin que sintiera gran entusiasmo por la ligadura previa de la femoral, que era en aquella fecha lo que principalmente se recomendaba, si bien ya he indicado que entre los cirujanos españoles, Argumosa rechazaba dicha ligadura, como acto previo a la desarticulación. Para que no quepa duda respecto a ideas enlazadas con fecha, voy a transcribir íntegro el párrafo, que data de noviembre de 1891. 'Los peligros de esta amputación son la hemorragia, y confieso que no estoy muy entusiasmado con la ligadura previa de la femoral, pues si bien es cierto que al hacer tal ligadura se consigue la hemostasia preoperatoria de la parte anterior del muslo, no influye absolutamente en nada en la hemorragia de las regiones posteriores, cuyos vasos son de la mayor importancia, y su sección es causa de mayores dificultades que la de los vasos anteriores.' Y más adelante, e insistiendo acerca de este hecho para mí capital, y como demostración de la idea que me guiaba al buscar un método exento de peligros, y al dar cuenta en la misma revista (número 416, 22 octubre 1893) de dos casos de desarticulación coxo-femoral, decía: 'Hay que tener el convencimiento de que en esta desarticulación el peligro no depende de las ramas continuación de la ilíaca externa, sino de las de la hipogástrica; el peligro está en los vasos posteriores: arterias obturatriz, isquiática, algunas ramas de la pudenda interna, y, sobre todo, de la glútea'. Y claro es que, así planteado el problema, debía dar un valor insignificante a la ligadura previa de la femoral, no sólo porque este vaso es fácil de encontrar y ligar antes de cortarlo, sea cual fuere el procedimiento que se emplee, sino y principalmente, porque la ligadura de la femoral no resuelve nada acerca de la hemorragia de las arterias posteriores de la raíz del muslo, y, por tanto, se imponía la necesidad de buscar un procedimiento merced al cual fuéramos dueños de dichos vasos.

"Para conseguir este fin, pensé en el empleo de la isquemia, siguiendo las ideas de Esmarch, y es hacer la operación en dos tiempos: amputación, alta con isquemia y enucleación, y así



Tres grabados de los Estudios monográficos de Cirugía española *(1916), obra en la que José Ribera Sans recapituló sus aportaciones originales y las integró en la tradición de la escuela quirúrgica procedente del magisterio de Diego de Argumosa. (1) "Nudo de pescador, ideado por Argumosa, principalmente para las constricciones de progresiva graduación". (2) "Paranudos recto y curvo, empleados cuando la constricción tiene que hacerse en regiones profundas e inaccesibles a los dedos". (3) "Sutura gastro-intestinal que comprende todo el espesor de la pared de ambas vísceras".*

debe decirse de la porción superior del fémur que quedaba en la parte alta del muslo después de la amputación. El primer caso en que llevé a la práctica este programa, fue operado el 1.º de diciembre de 1892, y publicado, con el procedimiento empleado, en el núm. 416 de la *Revista de Medicina y Cirugía Prácticas*, de Madrid, correspondiente al 23 de octubre de 1893.

"He aquí el procedimiento que entonces empleé: isquemia, por elevación del miembro; con un tubo largo de caucho rodeé la raíz del miembro, siguiendo por delante el pliegue de la ingle; cruzados los cabos y haciendo un nudo con ellos, que correspondía a la parte externa de la raíz del muslo, y tirando fuertemente de ellos al hacer el nudo, para que fuera la compresión enérgica, se dirigió el cabo anterior por la parte posterior del tronco y el posterior por la anterior, para cruzarse encima de la cresta ilíaca del lado derecho; una circular a la cintura, para ir a buscar de nuevo el pliegue de la ingle izquierda, con el fin de dar allí otra circular, es decir, una verdadera espica.

"Con rapidez amputación circular subtrocantereana; ligadura de vasos

anteriores y posteriores, en tanto que un ayudante sujetaba con los dedos el tubo elástico, para evitar todo peligro de deslizamiento; separación gradual del tubo elástico. Convencidos de que ningún vaso daba sangre, incisión externa a lo Langenbeck, hasta encontrar la incisión circular; denudación del fémur y desarticulación.

"Como se ve, el problema de la hemostasia previa en la desarticulación coxo-femoral estaba resuelto haciendo la operación en dos tiempos: amputación circular subtrocantereana, y después desarticulación; pero claro es que para ello era preciso que los casos se prestaran a estos dos tiempos, y, por tanto, era un procedimiento imperfecto, a pesar de lo cual pude emplearlo en cierto número de casos, dando cuenta de los mismos a la Real Academia de Medicina de Madrid, en la sesión de 16 de marzo de 1895 (*Anales* del 30 de marzo de 1895); lo expuse en mis lecciones de Clínica Quirúrgica General, publicadas en el mismo año, y sirvió dicho procedimiento de asunto para la tesis del Doctorado de mi discípulo Antonio Ortega, tesis sostenida el 23 de junio de 1897.

"Imperfecto como era, pues para mí lo es todo procedimiento que exige dos tiempos, y dejando también un muñón no del todo estético, porque las carnes sobraban y quedaba un muñón blando colgante, es lo cierto que, merced a él, pude hacer una serie de nueve desarticulaciones de fémur con excelente resultado para la vida, resultando, gracias a ello, que una operación considerada poco antes como de las más gravísimas, había adquirido, bajo este aspecto, la condición de las operaciones corrientes. Pero la Clínica se encargó de demostrar que sus aplicaciones eran limitadas.

"En octubre de 1897 ingresó en mi Clínica de la Facultad un individuo que tenía un cáncer encefaloide de la región antero-interna del muslo, ulcerado, y que llegaba a dos travesas del dedo del pliegue de la ingle, y con grandes infartos en la región inguinal; no era posible pensar en una amputación subtrocantereana y después desarticular, y no tuve más recurso que, estando aplicado el tubo, hacer un gran colgajo externo-posterior, y por delante una incisión semicircular inmediatamente por delante del tubo. Hice la hemostasia definitiva, quité el tubo compresor, y entonces hice la desarticulación, quedando demostrado que era posible la isquemia cortando un colgajo posterior, y que la amputación previa era inútil. Y como otros casos me demostraron la posibilidad de obrar así, sea cual fuere la forma y situación del colgajo, di cuenta de tales hechos y de los resultados obtenidos a la Real Academia de Medicina de Madrid, en la sesión del 5 de febrero de 1898 (*Anales* del 30 de marzo de 1898), procedimiento que seguí empleando hasta el 20 de enero de 1902, habiéndolo usado en nueve casos.

"Pero a pesar de los buenos resultados obtenidos y de haberse ampliado el campo de aplicación, desde el momento en que podía hacer cualquier colgajo, lo cierto es que quedaba el inconveniente, y para mí de gran importancia, de tener que quitar el tubo compresor antes de desarticular, y por esta razón, todas mis tentativas se dirigieron a acertar con un procedimiento en el cual la hemostasia previa se obtuviera hasta después de desarticular, dirigiendo todas las modificaciones a colocar el tubo de tal manera, que me permitiera desarticular sin quitar el tubo, cosa que únicamente podía conseguirse colocando el tubo de tal modo, que quedara libre el campo operatorio preciso para hacer la desarticulación. Para ello era preciso que el gran trocánter quedara por debajo del agente compresor, es decir, que era preciso hacer más alta la compresión, lo cual conseguí, después de muchas tentativas y ensayos, colocando el tubo en la ranura inter-glútea, en vez de seguir, como en las primeras tentativas, el pliegue glútico, pues colocado el centro en la ranura inter-glútea, los cabos se cruzan, naturalmente, por debajo de la cresta ilíaca del lado enfermo, muy por encima del gran trocánter, quedando de este modo dentro del espacio isquemiado, no sólo la articulación coxo-femoral, sino gran parte de la pelvis, y pudiendo hacer a voluntad, en la parte anterior, que el tubo comprimiera muy por encima del pliegue de la ingle. De esta manera, no sólo era posible la desarticulación de la cadera con isquemia preventiva, sino resecar a la vez porciones más o menos extensas del cinturón pelviano.

"El primer caso en que apliqué el procedimiento de isquemia así modificado, se refiere a un enfermo operado antes de artrectomía de la rodilla; hice la desarticulación de la cadera el 20 de enero de 1902, historia publicada en el tomo *Historias...*, correspondiente al curso de 1901 a 1902.

"El procedimiento así perfeccionado lo expuse en la ponencia que acerca del tratamiento de las tuberculosis articulares presenté a la sección de pediatría del Congreso internacional de medicina, celebrado en Madrid en el mes de abril de 1903."

Bases de la neurogénesis en *Drosophila melanogaster*

Los neuroblastos, células progenitoras del sistema nervioso de Drosophila, *derivan del ectodermo junto con los epidermoblastos, progenitoras de la epidermis. ¿Qué genes deciden sobre el destino de ambos tipos celulares?*

José A. Campos-Ortega y Fernando Jiménez

El proceso que conduce a la formación del sistema nervioso central (SNC) recibe el nombre de neurogénesis. Se desarrolla según principios muy similares en la mayoría de los animales. En la neurogénesis podemos reconocer tres fases fundamentales. En la primera de ellas, durante el período temprano del desarrollo embrionario, una región del ectodermo se diferencia de las restantes al adquirir capacidades neurogénicas. En la segunda, células aisladas o grupos celulares contiguos, según sea la especie de que se trate, se separan de la región neurogénica constituidas en células progenitoras del SNC para alcanzar la posición definitiva del primordio neural. Por último, en la tercera fase, los progenitores neurales proliferan, para dar lugar, tras complejos procesos de diferenciación celular, a neuronas y células gliales.

Son muchas las preguntas que se le plantean al investigador de la neurogénesis ante la consideración de las tres fases descritas. Pretende entender, en primer término, cuáles son los mecanismos a través de los que una zona determinada del ectodermo adquiere la capacidad de formar células progenitoras neurales; en segundo término, quiere averiguar mediante qué procesos pueden esas células originar la ingente variedad de tipos de neuronas y células gliales que pueblan el SNC de cualquier animal. Reduciendo esas dos cuestiones a sus términos más generales, diríamos que el estudio de la neurogénesis se propone desentrañar por qué, en el embrión, unas células poseen capacidades diferentes de las de otras. En definitiva, se trata de la pregunta sobre el origen de la diversidad celular, una de las cuestiones fundamentales de la biología del desarrollo.

En los vertebrados, el ectodermo adquiere capacidad neurogénica mediante un proceso de inducción que parte del primordio del mesodermo. (El ectodermo y el mesodermo son dos hojas embrionarias que dan lugar a la piel y sistema nervioso, el primero, y a los músculos, huesos, sangre, etcétera, el segundo.) La inducción se produce por medio de interacciones celulares, que conducen a la formación de la placa neural, que es una placa de orientación anteroposterior en la superficie dorsal del embrión. La placa neural se invagina y, fuera ya de la superficie embrionaria, constituye el tubo neural. La inducción de la placa neural por parte del primordio del mesodermo, descubierta en 1921 por Hilde Pröscholdt y Hans Spemann, ha sido objeto desde entonces de intensa investigación, pero tanto la base de la misma como la propia "substancia inductora" se han resistido al trabajo de los estudiosos. Ello explica que, si bien el interés por el proceso de inducción no ha decaído, haya bajado de modo muy notable el número de investigaciones realizadas en los últimos tiempos.

En los insectos, por ejemplo en *Drosophila melanogaster*, la mosca del vinagre, la neurogénesis sigue en principio las mismas pautas. Pero, formalmente, podemos establecer una diferencia considerable en la neurogénesis de vertebrados e insectos. En los primeros, la región neurogénica da lugar, exclusivamente, a tejido nervioso mediante el proceso de invaginación del tubo neural; en la región neurogénica de los insectos, las células progenitoras del SNC, llamadas neuroblastos, se encuentran mezcladas con otras células: los epidermoblastos, que son las células progenitoras de la epidermis ventral y cefálica, con sus anexos. Las células progenitoras neurales y epidérmicas se separan unas de otras en las fases tempranas de la embriogénesis. En efecto, los neuroblastos migran hacia los niveles internos del embrión, en tanto que los epidermoblastos permanecen en la superficie externa. Los presuntos neuroblastos y epidermoblastos se encuentran en relación de contigüidad antes de que se produzca la segregación de los dos linajes celulares. Es decir, son células vecinas que se enfrentan ante el dilema de decidir entre dos formas posibles de desarrollo. Pese a la diferente constitución del primordio neural en vertebrados e invertebrados, la pregunta que se plantea el investigador de la neurogénesis en los insectos es la misma que la expuesta más arriba: ¿Qué mecanismos permiten la dicotomía de linajes epidérmicos y neurales dentro del ectodermo neurogénico? Hoy sabemos que esos mecanismos están también basados en interacciones celulares matenidas, no entre el mesodermo y el ectodermo, como en los vertebrados, sino entre las mismas células del ectodermo neurogénico.

Así, pues, tanto en la inducción de la placa neural de los vertebrados como en la decisión de las células ectodérmicas de los insectos por uno de los dos destinos celulares posibles, son las interacciones celulares las responsables del desarrollo diferencial de una población celular que comenzó siendo homogénea. Cabe suponer que, además del desarrollo embrionario, sean también similares las bases moleculares de la neurogénesis de vertebrados e invertebrados.

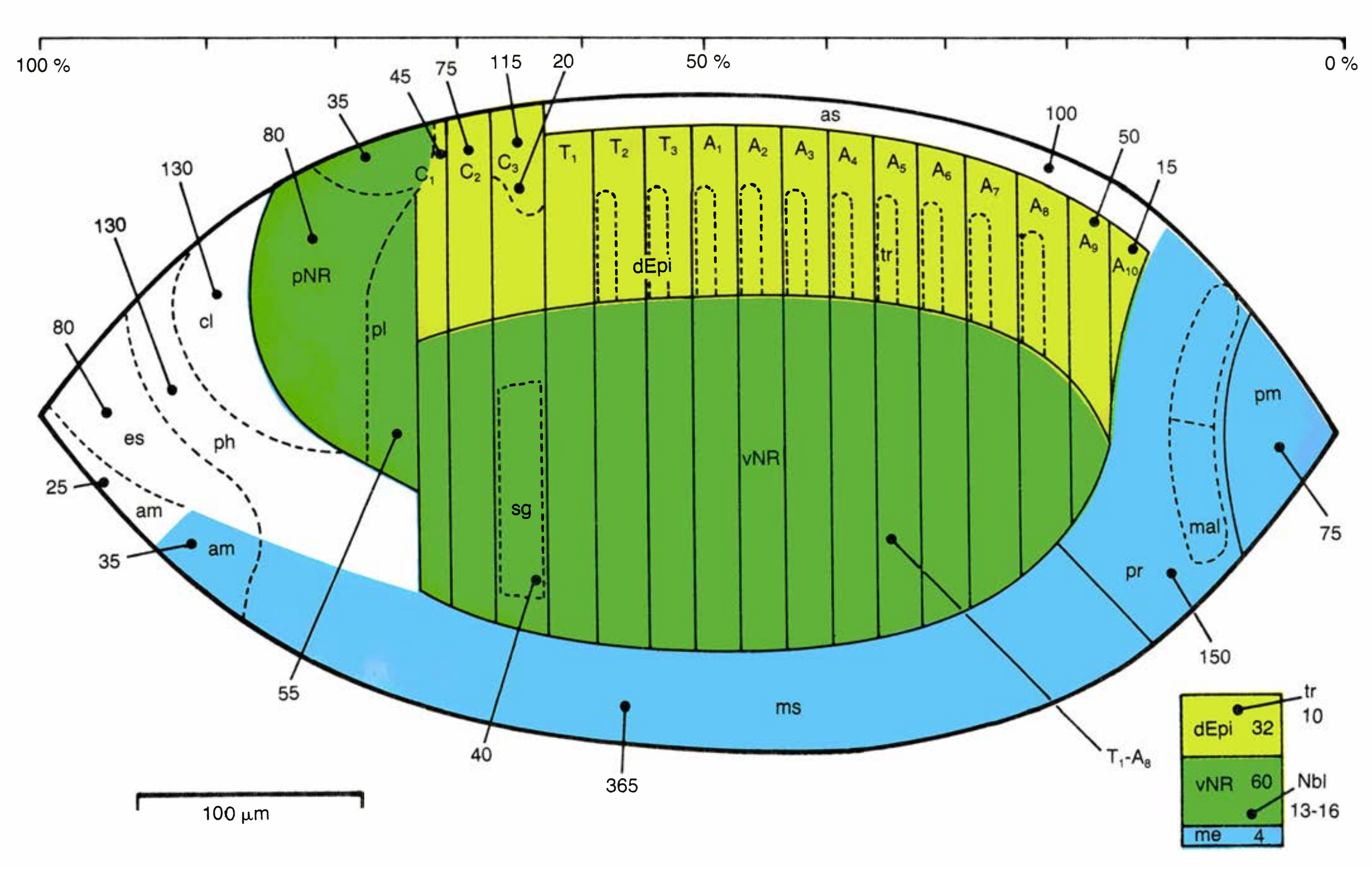
En *Drosophila*, los procesos interactivos de que estamos tratando se producen, probablemente, durante el blastodermo, un estadio temprano del desarrollo embrionario de los insectos en que acontece la formación de las células que darán lugar al cuerpo de la larva. En Colonia hemos conseguido establecer recientemente, en colaboración con nuestros colegas V. Har-

tenstein y G. Technau, un mapa de destinos celulares del blastodermo de *Drosophila*, sirviéndonos de distintos métodos anatómicos. A través de recuentos celulares determinamos las dimensiones de la región neurogénica y, gracias a la inyección de sustancias marcadoras en ciertas células del blastodermo, pudimos estudiar las células descendientes (progenies) de las inyectadas. Descubrimos, así, que, en el blastodermo del animal normal, antes de ocurrir la dicotomía neuro-epidérmica, la zona neurogénica contiene 1800 células; unas 450, esto es, el 25 por ciento de las mismas, se desarrollan en neuroblastos; las 1350 restantes, o sea, el 75 por ciento, en epidermoblastos.

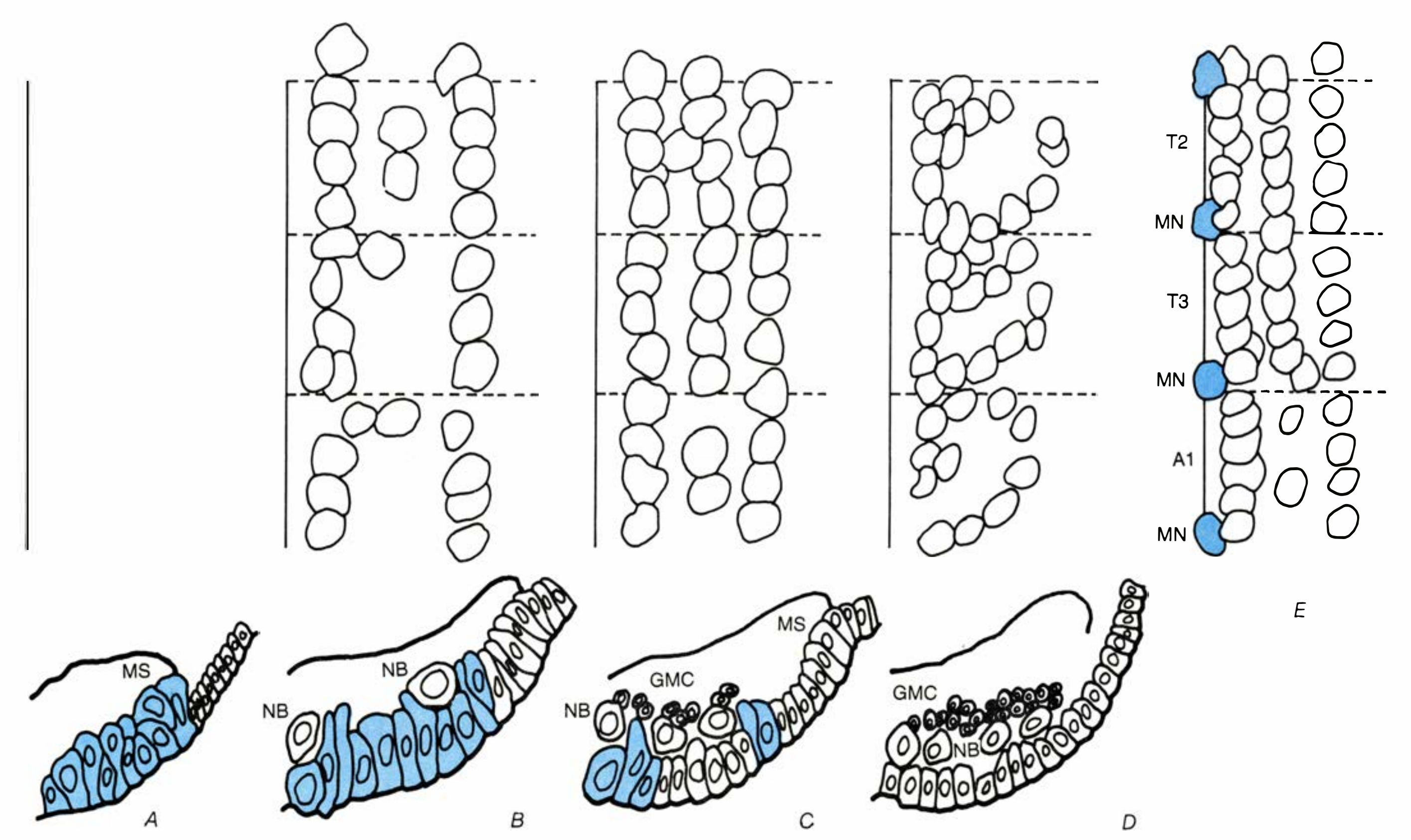
Antes de comenzar a separarse los dos linajes, las células de la región neurogénica muestran ciertas modificaciones muy llamativas. Así, antes de la segregación de los neuroblastos, el volumen de cada una de las células de la región neurogénica aumenta; al propio tiempo, el volumen de las restantes células embrionarias —las pertenecientes a regiones no neurogénicas— decrece. Al engrosamiento de las células del ectodermo neurogénico sigue la segregación de los neuroblastos, que mantienen su tamaño grande. (Conviene recordar que los neuroblastos constituyen las mayores células de todo el embrión.) Por último, concluida la segregación, las células que permanecen en el exterior menguan de tamaño, igualándose a las demás células ectodérmicas.

¿Qué significan esos cambios volumétricos? En primer lugar, sugieren que todas las células de la región neurogénica adquieren simultáneamente la capacidad de desarrollarse en neuroblastos. Inician, incluso, una diferenciación neurogénica manifestada en el aumento del volumen celular, por más que sólo un cuarto de la población celular total convertirá en realidad esa capacidad. La disminución volumétrica de los epidermoblastos, consecutiva a la segregación de los neuroblastos, sugiere, en segundo lugar, que los propios epidermoblastos se desvían de la realización de su capacidad neurogénica debido a la acción de un factor que desconocemos. Más adelante presentaremos pruebas de que ese hipotético factor podría corresponder a la función de un grupo de genes, llamados neurogénicos.

Nuestro colega Gerhard Technau ha desarrollado una técnica de trasplante celular con cuya ayuda se pudo verificar experimentalmente la hipótesis según la cual todas las células de la región neurogénica poseen la capacidad de desarrollarse en neuroblastos, así como establecer también otros aspectos importantes de la embriogénesis de *Drosophila*. La técnica en cuestión consta de dos etapas. En la primera, se marcan las células a trasplantar; a tal



1. MAPA DE DESTINOS de las células del blastodermo de *Drosophila melanogaster*, establecido en nuestro laboratorio de Colonia en colaboración con Volker Hartenstein y Gerhard Technau. El dibujo se basa en la reconstrucción planimétrica de la mitad izquierda de un embrión en el estadio de blastodermo. El dibujo está orientado de suerte tal que el dorso del embrión aparece en la parte superior y la porción anterior en la izquierda de la figura. La región azul representa zonas que se invaginarán en fases ulteriores de la embriogénesis: los primordios del mesodermo (*ms*), del proctodeo (*pr*) y del intestino medio posterior (*pm*); las restantes células permanecerán en la superficie para formar el ectodermo y la amnioserosa (*as*). Los números indican las células que pueblan cada primordio. Ahora bien, puesto que la figura muestra sólo la mitad izquierda del embrión, hemos de multiplicar por dos las cifras al objeto de obtener correctamente el número total de células primordiales de los distintos órganos. La escala de la parte superior da una medida relativa de la longitud del huevo (0 por ciento es el polo posterior, 100 por 100 el polo anterior). Las abreviaturas *pNR* y *vNR* designan las regiones neurogénicas: procefálica y ventral, respectivamente. De ellas derivan los neuroblastos y en su seno ocurren los procesos descritos en el texto. El rectángulo tricolor de la parte inferior derecha indica el número de células contenidas en cada primordio de los hemisegmentos torácicos y abdominales (T1-A8). Es decir, 32 células en el primordio epidérmico dorsal (*dEpi*), incluidas las 10 que originarán las tráqueas (*tr*), 60 en la región neurogénica ventral (*vNR*), de las que 13-16 se desarrollarán en neuroblastos (*Nbl*), y cuatro células mesectodérmicas (*me*). La línea horizontal de la parte izquierda marca 100 micrometros, que corresponden a 14 diámetros celulares. Otras abreviaturas de la figura son: *C1-C3*, segmentos del gnatum, mandibular, maxilar y labial; *T1-T3*, segmentos torácicos; *A1-A10*, segmentos abdominales; *am*, intestino medio anterior; *as*, amnioserosa; *cl*, clipeolabro; *es*, esófago; *mal*, túbulos de Malpighi; *ph*, faringe; *pl*, lóbulo procefálico; *sg*, glándula salivar.



2. CORTES TRANSVERSALES de la zona neurogénica izquierda (*abajo*), ordenados desde la parte anterior (*A*) hasta la posterior (*D*); los dibujos de la serie superior muestran el mapa de neuroblastos, en cada uno de los estadios considerados, de los hemisegmentos T2, T3 y A1; el de la derecha (*E*) es una reconstrucción idealizada de la población completa de neuroblastos (*mn* designa los neuroblastos medianos). La raya vertical marca la línea media ventral del embrión. En *A* las células del ectodermo neurogénico han engrosado considerablemente, antes de comenzar la segregación. La segregación de los neuroblastos (*nb*) no es un proceso continuo, sino que se desarrolla en tres olas consecutivas, representadas en *B* y *C*. Conforme los neuroblastos se van separando del ectodermo, el número de células con capacidades neurogénicas que permanecen en el mismo (*sombreado azul*) decrece. El patrón de distribución de los neuroblastos, luego de su segregación, es bastante preciso y reproducible de un individuo a otro; sufre, empero, notables modificaciones a lo largo del desarrollo, que vienen condicionadas, sobre todo, por las divisiones de los neuroblastos para dar origen a las células ganglionares madres (*gmc*), fuente éstas de las neuronas.

fin se inyecta, en un embrión muy joven, antes de la formación celular, una mezcla de dos substancias de efectos anodinos en la fisiología celular, pero cuya presencia se deja fácilmente demostrar: peroxidasa de rábano (HRP) y fluoresceína (FITC). La mezcla inyectada difunde rápidamente por todo el embrión y así lo van incorporando en su interior las nuevas células originadas. En los insectos, las primeras mitosis del desarrollo embrionario sólo afectan los núcleos. La formación de células tiene lugar luego de la décimotercera división, cuando el embrión contiene más de 5.000 núcleos. El embrión marcado sirve, pues, de donante de células.

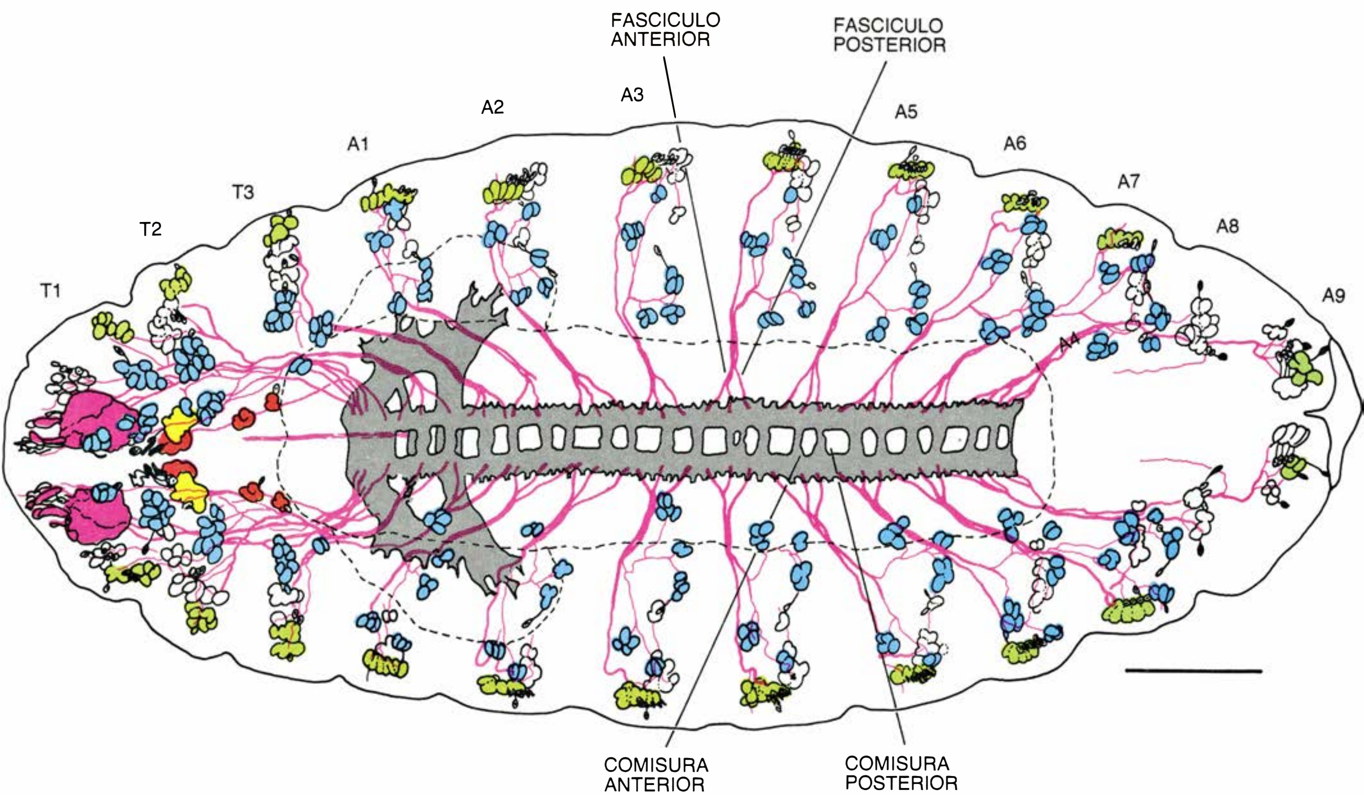
En la segunda etapa, con la ayuda de un microcapilar, se retiran unas cuantas células marcadas con HRP de una región determinada del embrión donante, por ejemplo de la región neurogénica, y células individuales de las marcadas son trasplantadas homotópica o heterotópicamente en otro embrión, cuyas células no están marcadas. La célula trasplantada se desarrolla en el segundo embrión con plena normalidad. Concluido el desarrollo, o al menos terminada la organogénesis, una técnica histoquímica sencilla nos pondrá de manifiesto la HRP contenida en las células descendientes de las trasplantadas, permitiendo el estudio de las características morfológicas del clon celular surgido de la célula trasplantada.

Uno de los resultados más reveladores de cuantos nos ha ofrecido esta técnica de trasplante estriba en haber comprobado que, no sólo las células de la región neurogénica, sino, en principio, todas las células ectodérmicas poseen capacidad neurogénica: el desarrollo final de un neuroblasto o de un epidermoblasto dependerá, por lo que se ve, de las interacciones entre esa célula y sus vecinas inmediatas.

Los resultados de trasplantes homotópicos (de una región de un embrión a la misma región en otro embrión) confirman lo que sabemos de las capacidades de las células ectodérmicas. Cuando se trasplantan células de la parte ventral del embrión donante (región neurogénica) en la misma región del embrión receptor, las células trasplantadas originan clones de células neurales, clones de células epidérmicas o clones mixtos de neurales y epidérmicas. El número de clones neurales obtenidos en este experimento es muy alto, lo que da a entender que el destino neural es más probable que el destino epidérmico.

Si el trasplante homotópico fue de células de la parte dorsal, no neurogénica, del ectodermo del donante en la parte dorsal del embrión receptor, las células trasplantadas originan, exclusivamente, clones de células epidérmicas. Pero si las mismas células dorsales las trasplantamos heterotópicamente en la región ventral del embrión receptor, éstas darán lugar a clones de células neurales. En condiciones normales, las células dorsales carecen de capacidad neurogénica; bajo la influencia de las células de la región neurogénica, las mismas células sí pueden desarrollarse en neuroblastos. Todo parece indicar que las células de la región neurogénica pueden comunicar a las células dorsales la capacidad neurogénica.

Volvamos al curso normal de la embriogénesis. Producida la separación de los neuroblastos, los epidermoblastos prosiguen su desarrollo, dividiéndose por tres veces consecutivas antes de construir las estructuras propias de la capa epidérmica de la larva.



3. SISTEMA NERVIOSO PERIFERICO (SNP) del embrión a término (*abajo*), en un dibujo de Volker Hartenstein, de Colonia. La parte anterior del embrión corresponde a la izquierda de la figura. Se destacan los órganos sensoriales y sus axones, en vista ventral, teñidos con un anticuerpo dirigido contra un antígeno de localización neural general. La cuerda ventral y los ganglios supraesofágicos y subesofágicos del SNC están representados por una línea interrumpida, las estructuras del neuropilo, es decir, las comisuras (*ac* o comisura anterior y *pco* o comisura posterior) y los conectivos (*rayas verticales*). Los órganos sensoriales muestran una organización metamérica o segmentaria (T1-A9), con un patrón de distribución extraordinariamente preciso. En los segmentos torácicos T1-T3 y abdominales A1-A7, los órganos sensoriales se congregan en tres grupos: los del grupo ventral aparecen sombreados en azul, los del grupo central en verde y, en blanco, los correspondientes al grupo dorsal. Por mor de claridad se ha omitido la denominación de los distintos órganos sensoriales. Los nervios segmentarios poseen dos fascículos: anterior *af* y posterior *pf*. El fascículo anterior, con dos raíces, conduce los axones de los órganos sensoriales en los grupos laterales y dorsales; el posterior, con una sola raíz, conduce los axones de los del grupo ventral. La raya horizontal (*abajo, a la derecha*) señala una longitud de 50 micrometros. La fotografía superior muestra una visión ventral de un embrión teñido con un anticuerpo dirigido contra un antígeno neural, distinto del utilizado para el embrión del dibujo, localizado predominantemente en las estructuras del SNP. (El anticuerpo nos lo ha proporcionado A. Ferrús.)

Toda la capa epidérmica está revestida de cutícula, un producto de secreción en cuya formación participa cada una de las células epidérmicas. Incluidas en la cutícula hay cerdas y pelos, además de otras estructuras; son, en su mayoría, órganos sensoriales que registran todo tipo de estímulos químicos, mecánicos o térmicos, y gracias a los cuales la larva cuenta con la información necesaria para su vida de relación.

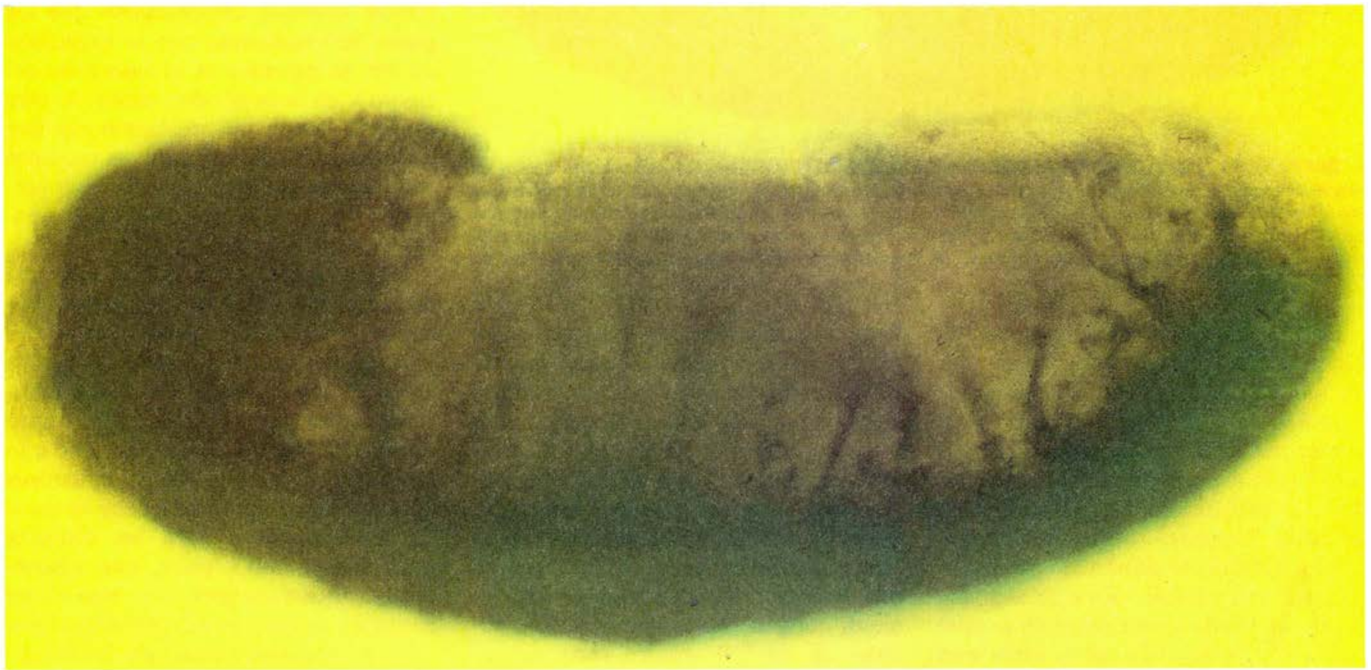
A diferencia de lo que ocurre en los vertebrados, cuyas neuronas de los órganos sensoriales derivan de la placa neural y envían sus axones a la periferia, los órganos sensoriales de los insectos son parte de la progenie de los epidermoblastos: se desarrollan en la propia epidermis, desde donde envían sus prolongaciones axonales hasta alcanzar el SNC. Los axones de las neuronas motoras crecen a lo largo de los axones sensoriales en dirección a los músculos y forman el sistema nervioso periférico (SNP): una red de prolongaciones sensoriales y motoras de organización compleja y extraordinaria precisión arquitectónica.

Aquí también, en el caso del desarrollo del SNP, se repite de nuevo un proceso de toma de decisión entre dos caminos alternativos. Por lo que se ve, en la determinación de los progenitores celulares del SNP intervienen los mismos factores que en la decisión del SNC. Esto es, las células deciden entre un linaje neural (los órganos sensoriales) y otro no neural (células epidérmicas comunes). De acuerdo con las pruebas disponibles participan los mismos elementos en las dos decisiones: en la temprana de las células ectodér-



4. EMBRION que contiene un clon de neuronas (*arriba*); las células nerviosas del clon (*mancha roja*) derivan de una célula marcada con peroxidasa de rábano (HPR), célula ésta que se había trasplantado antes a partir de la región neurogénica de un embrión donante a la región neurogénica de un embrión receptor, el aquí mostrado. La fotografía inferior recoge, aumentada, la región del embrión que contiene el clon (*zona anterior, a la izquierda*). Experimento y fotografías han sido realizados por Gerhard Technau. Una sencilla reacción histoquímica permite demostrar la presencia de HPR en algunas células del embrión receptor, una vez ha completado éste el proceso de organogénesis. Las características morfológicas de las células marcadas (forma, tamaño, número y localización) permiten el diagnóstico del histotipo celular. Este clon es de histotipo neural, porque comprende 8-10 células de tamaño mediano ubicadas en el SNC (en la cuerda ventral, *vc*), con prolongaciones neurales (axones indicados por la línea que cruza la mancha) dentro de las estructuras del neuropilo.



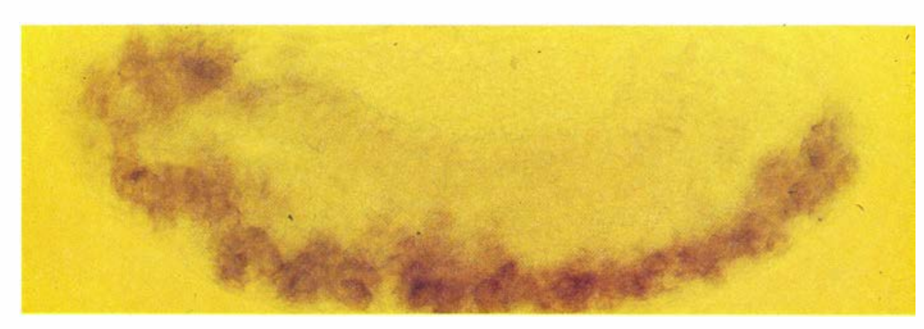
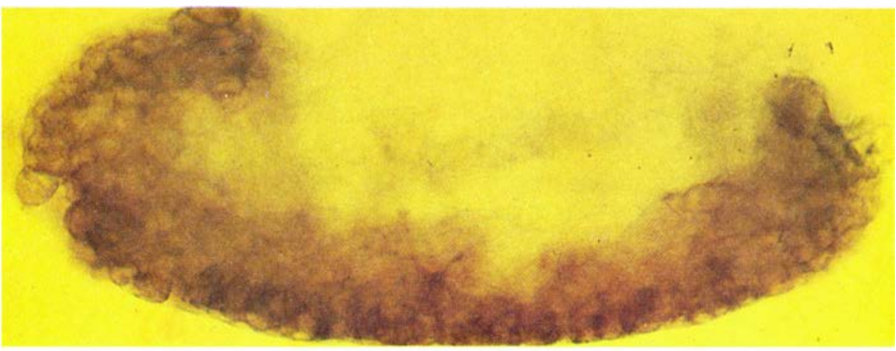


5. VISTA LATERAL Y MEDIAL de un embrión normal, teñido con un anticuerpo dirigido contra un antígeno de localización neural (*arriba*). La parte anterior del embrión corresponde a la izquierda. El SNC consta de la cuerda ventral, los ganglios supraesofágicos y el ganglio subesofágico. La mayoría de los nervios y órganos sensoriales se encuentran fuera del plano de foco de la figura; de ahí que no aparezcan. La fotografía inferior nos ofrece una vista lateral de un embrión homocigótico para la mutación *biblD06*, teñido con el mismo anticuerpo. De las fotografías se desprende que el embrión mutante posee un SNC mucho mayor que el normal y que carece de epidermis en sus porciones ventral y cefálica. Varios nervios periféricos están en el plano de foco del mutante.

micas entre neuroblasto y epidermoblasto y en la tardía de las células epidérmicas entre órgano sensorial y epidermis común.

La mosca del vinagre es un organismo que, por sus características (ciclo reproductor de corta duración, cromosomas politénicos, gran resistencia física que permite la experimentación, fácil cultivo en el laboratorio gracias a su pequeño tamaño, etcétera), se presta a todo tipo de estudios genéticos. El investigador tiene, además, a su disposición un cuerpo importante de conocimientos, técnicas e instrumentos genéticos, acumulados a lo largo de los 75 años en que se vienen realizando trabajos de esta índole en *Drosophila*. Todo ello convierte a este insecto en el organismo idóneo para estudiar el papel desempeñado por los genes en el desarrollo del sistema nervioso.

Durante los últimos ocho años, el trabajo de nuestro laboratorio de la Universidad de Colonia ha ido encaminado a identificar los genes que participan en las decisiones de las células ectodérmicas y estudiar, consiguientemente, su organización funcional y la lógica de sus interacciones con otros genes en el genoma. La búsqueda de los genes cuya función se requiere para un determinado proceso biológico se realiza a través de un análisis mutacional. Este, en sus líneas generales, sigue siempre el mismo esquema: o bien se inducen, de forma casual, mutaciones mediante uno de los agentes mutágenos al uso (rayos X, EMS u otros), o bien se utilizan mutaciones ya existentes y provocadas por otros investigadores para la consecución de fines distintos. Se estudian luego los fenotipos producidos por esas mutaciones, seleccionando aquellas cuyo fenotipo indica que el gen correspondiente puede guardar alguna relación con la función biológica que se estudia. La investigación ulterior de las mutaciones seleccionadas permite, con los métodos habituales de la genética, identificar el gen implicado. Las mutaciones encontradas a lo largo de nuestro estudio facilitaron la identificación de una clase fundamental de genes, que nosotros llamamos *neurogénicos*, cuya función normal resulta indispensable para la realización de la dicotomía neuro-epidérmica.

6. DEFECTOS MORFOGENETICOS DE LOS MUTANTES NEUROGENICOS: débense a que todas las células de la región neurogénica se desarrollan formando neuroblastos. La fotografía superior muestra los neuroblastos de un embrión con genes neurogénicos normales, teñidos con un anticuerpo dirigido contra un antígeno neural. El embrión de la fotografía inferior corresponde a un mutante para uno de los genes neurogénicos, y en ello difiere del caso anterior. El embrión mutante contiene unos 1800 neuroblastos.

Los genes suelen designarse de acuerdo con el defecto fenotípico producido por la mutación que pone de manifiesto su existencia. Y puesto que la mayoría de las mutaciones sacadas a la luz en la experimentación corresponden a la eliminación del gen normal interesado, los genes reciben la denominación del defecto producido por la ausencia de su función. En este sentido, el primer gen de cuya existencia se tuvo noticia en *Drosophila* fue el *white eyes* (ojos blancos), así llamado en virtud de la mutación que tornaba blanco el color rojo de los ojos característico del insecto. Sin embargo, la función normal del gen *white* no era otra que la producción de ojos pigmentados de rojo.

Los genes neurogénicos deben tal apelativo a su comportamiento: la ausencia de uno cualquiera de ellos da lugar a un SNC hiperplásico, es decir, mucho mayor, hasta cuatro veces más, que el de la estirpe salvaje. Ocurre incluso que las zonas del SNP de estos mutantes que consiguen desarrollarse son hiperplásicas. Por contra, es hipoplásica la cubierta epidérmica, pues falta totalmente la epidermis de las regiones ventral y cefálica.

Sin embargo, a pesar de su nombre, la función normal de los genes neurogénicos estriba en permitir el desarrollo de la epidermis. Los restantes órganos de los mutantes neurogénicos quedan afectados tan sólo de manera indirecta; es decir, debido a la hiperplasia neural y a la hipoplasia epidérmica. Así la exagerada anormalidad de la musculatura obedece a la carencia de paredes para su inserción; los defectos que presenta la faringe, que está completamente evertida, a que el animal está desprovisto de cabeza. Estos defectos fenotípicos son propios de individuos portadores de una mutación neurogénica en homocigosis, es decir, portadores de una mutación en cada uno de los dos alelos del gen. Tales homocigotos, dotados de un SNC cuatro veces mayor que el normal y carentes de epidermis, son incapaces de salir del huevo y terminan muriendo. Animales portadores de mutaciones de este tipo en condiciones heterocigóticas, es decir, presentadas sólo por una de las dos copias (alelos) del gen correspondiente, son capaces de vivir normalmente, pues la copia restante puede suplir la falta del otro alelo. Ello nos permite mantener esas mutaciones en el laboratorio a lo largo de generaciones.

Los defectos mencionados se deben a que la dicotomía neuro-epidérmica no funciona de manera correcta en los mutantes neurogénicos. En estos embriones, todas las células que componen la región neurogénica se desarrollan en neuroblastos: 1800 en vez de los 450 neuroblastos que normalmente se forman. Ello conduce a la gran hiperplasia del SNC que observamos en el mutante. Faltan, además, las células que normalmente originan la epidermis ventral y cefálica, 1350 células, pues todas ellas se han desarrollado en neuroblastos; ello provoca la hipoplasia epidérmica. Vemos así que, a pesar de su nombre, la función normal de los genes neurogénicos consiste en permitir el desarrollo de los epidermoblastos.

Conocemos ya ocho genes neurogénicos, si bien es posible que el número total de los existentes en el genoma de *Drosophila melanogaster* sea más elevado. Se caracterizan por ciertas peculiaridades. Así, la eliminación absoluta de la función de cualquiera de ellos conduce a idénticos defectos en todos los casos, de suerte que los fenotipos correspondientes no pueden distinguirse unos de otros. En ensayos acometidos con nuestra colaboradora Ursula Dietrich demostramos que los genes neurogénicos, con la excepción de *bib*, se expresan en el desarrollo del cigoto y en la oogénesis; dicho de otra manera, tienen manifestación cigótica y maternal. Por otra parte, se requiere su función para el desarrollo de la epidermis adulta e intervienen en la neurogénesis.

Hemos indicado ya que la ausencia de la función de uno de los genes neurogénicos acarrea consecuencias letales para el organismo afectado. Por cuya razón el estudio de la expresión fenotípica de los genes neurogénicos, tanto durante la fase de oogénesis como a lo largo del desarrollo de la epidermis adulta, no pudo llevarse a cabo en moscas homocigóticas para las distintas mutaciones; hubo, pues, que acometerlo en mosaicos genéticos, esto es, en animales con dos genotipos diferentes.

La generación y detección de mosaicos genéticos en *Drosophila* requiere acudir al empleo de técnicas de aplicación sencilla. Por lo general, basta con irradiar mediante rayos X embriones o larvas heterocigóticas para la mutación cuyos efectos se pretende estudiar. Dicha irradiación produce reorganizaciones cromosómicas que resultan en una célula homocigótica para esa mutación. Dicha célula origina, una vez ha proliferado, un clon celular de descendientes suyos. Tales animales albergan, pues, células homocigóticas para la mutación que se pretende estudiar, así como células heterocigóticas. Sus genotipos respectivos pueden distinguirse fenotípicamente entre sí mediante marcadores celulares; por ejemplo, a través de mutaciones localizadas en el brazo cromosómico donde se halla la mutación particular cuyos efectos se propone uno investigar; estas mutaciones no implican, de suyo, efectos deletéreos sobre el órgano o tejido cuyos genes están sujetos a estudio, si bien se expresan allí de manera evi-

dente (afectan, por ejemplo, a la pigmentación o la morfología de las células).

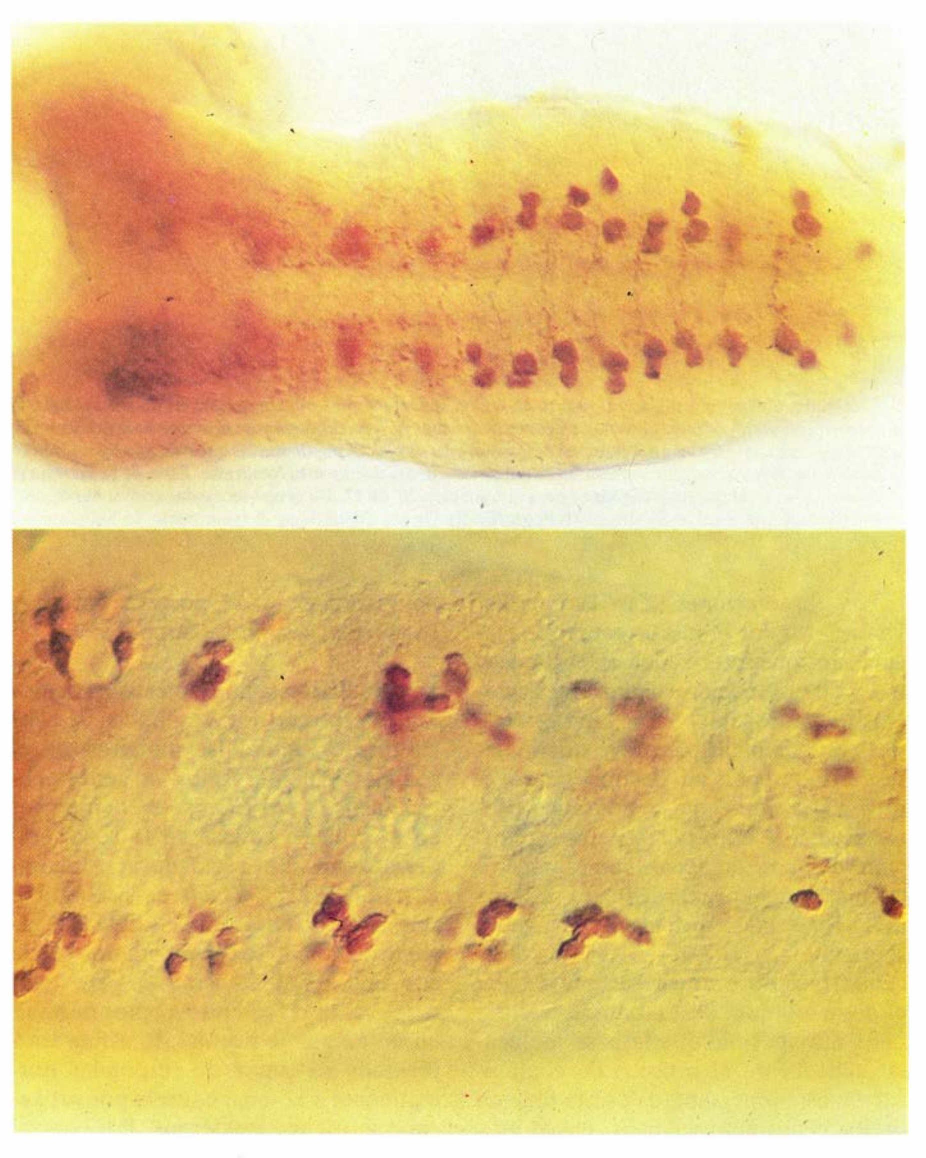
El estudio de los mosaicos nos permitió comprobar dos puntos importantes. En primer lugar, los mosaicos demostraron que, durante el desarrollo de la epidermis imaginal del insecto adulto, la función de los genes neurogénicos era similar a la que ejercían en las células de la epidermis larvaria, es decir, permitir que se desarrolle la epidermis, evitando que se desarrollen neuroblastos. La ausencia de función de uno de los genes neurogénicos conlleva la formación de un número excesivo de órganos sensoriales, fenómeno que ocurre a expensas de las células no sensoriales de la epidermis. El segundo punto importante derivado del estudio de estos mosaicos fue la comprobación de que los productos de los genes neurogénicos son incapaces de difundir a través de largas distancias; en caso contrario, las células homocigóticas mutantes no hubieran desarrollado defecto morfogenético alguno, ya que hubieran recibido el producto génico correspondiente de las células normales de su entorno. De lo que se infiere que estos productos génicos tienen que obrar autónomamente, en las propias células, o bien han de hacerlo sobre las células mutantes que se hallan en contacto inmediato con las normales.

Por vía experimental puede mostrarse que los productos de los genes neurogénicos obran sobre las células vecinas y, en consecuencia, que los genes neurogénicos, salvo *E(spl)*, no poseen expresión celular autónoma. La expresión del fenotipo neural por parte de una célula que es homocigótica para una mutación neurogénica depende de que la célula mutante en cuestión se encuentre rodeada por otras células mutantes. Pero si la mutante está rodeada por células normales, entonces su comportamiento será también normal.

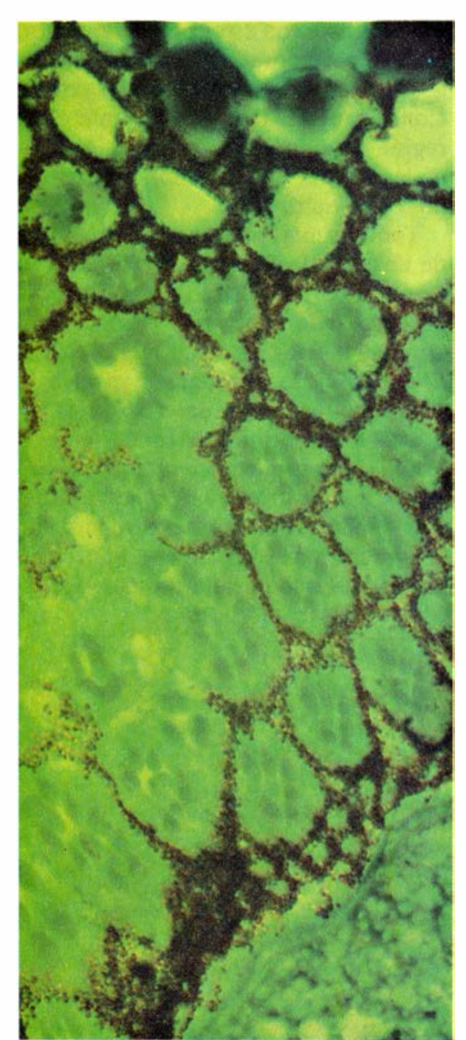
A esta conclusión nos llevó una serie de experimentos realizados en nuestro laboratorio por nuestro colaborador Gerhard Technau, acometidos mediante la técnica de trasplante antes descrita. En esos ensayos, los embriones donantes de células marcadas, que contenían la mezcla de HRP y FITC, eran homocigóticos para una de las mutaciones neurogénicas; se trasplantaron, una a una, células de la región neurogénica de embriones mutantes a embriones receptores, sin marcar, de la estirpe normal. Con la excepción de células homocigóticas para mutaciones del gen *E(spl)*, todas las células mutantes trasplantadas se comportaron igual que las células de la estirpe salvaje: las células trasplantadas, de la región neurogénica de los mutantes a la región neurogénica de embriones normales, originaron tres tipos de progenies: clones de células nerviosas, clones de células epidérmicas y clones mixtos de células nerviosas y epidérmicas; y dieron lugar a ellos en la misma proporción que si se hubiera trasplantado células normales.

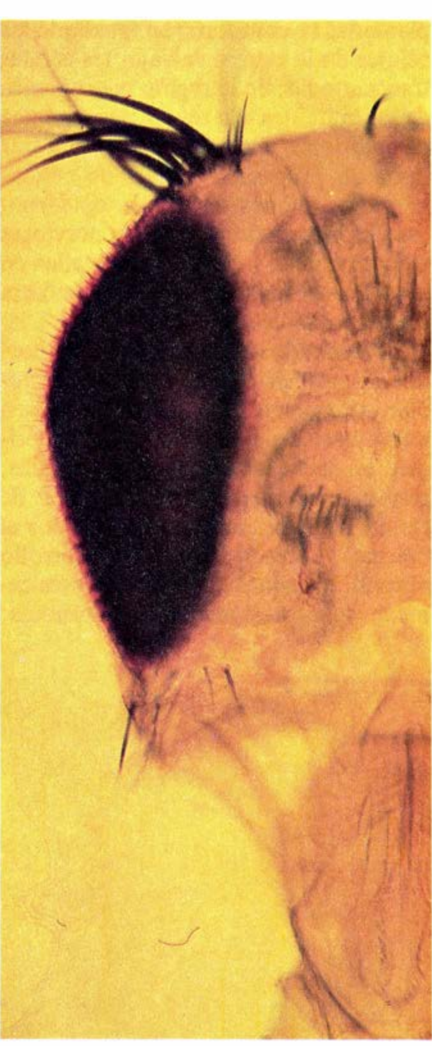
El resultado merece destacarse, porque las mismas células mutantes se hubieran desarrollado invariablemente en neuroblastos de su organismo de origen. Es decir, las células trasplantadas, genotípicamente mutantes, reciben de las normales situadas a su alrededor el "factor" necesario para el desarrollo normal: los genes correspondientes carecen de expresión celular autónoma. En contraste con este comportamiento, células portadoras de mutaciones del gen *E(spl)* originaron exclusivamente clones neurales tras su trasplante en la región neurogénica de animales normales; o sea, el gen *E(spl)* se expresa de forma autónoma.

Todo apunta, pues, a que el contacto de unas células con otras conduce a su decisión por un destino dado. El papel desempeñado por las interacciones mantenidas por las células de la región neurogénica lo abordamos ya al examinar los resultados de trasplantes celulares de embriones normales en embriones asimismo normales. Nos volvemos a encontrar ahora con una situación similar, en la que el contacto con células normales impide el destino neurogénico de una célula mutante y permite su desarrollo normal.



7. HIPERPLASIA DEL SISTEMA NERVIOSO CENTRAL, característica de los mutantes neurogénicos. Ese fenómeno se debe a la multiplicación de linajes celulares habituales en la estirpe salvaje. Nuestras investigaciones a este respecto no han aportado hasta la fecha prueba alguna de que las mutaciones neurogénicas creen nuevos tipos celulares. La fotografía superior nos ofrece el SNC disecado de un embrión normal y teñido con un anticuerpo dirigido contra la serotonina. El antígeno se encuentra sólo en dos neuronas por hemisegmento. La foto inferior muestra, en la misma orientación, parte del SNC de un mutante neurogénico teñido con el mismo anticuerpo. Cada hemisegmento contiene 6-8 células con capacidad antigénica.





8. CLON de células homocigóticas para la mutación *mamIB99* en el ojo compuesto de un animal heterocigótico (*izquierda*). Los omatidios mutantes contienen más de siete rabdómeros característicos del omatidio normal; además, el territorio del clon está desprovisto de las células pigmentarias que rodean a los omatidios normales, como los que se encuentran fuera del territorio del clon en esta fotografía. En la de la derecha se ofrece un clon de células homocigóticas para la mutación *Dl 6B37*. Un grupo de cerdas crecen donde normalmente sólo hay una cerda única. (Fotografías de Ursula Dietrich en el laboratorio de los autores.)

Las observaciones descritas nos llevan a formular hipótesis sobre los mecanismos que intervienen en el proceso de la determinación celular en el ectodermo neurogénico. La hipótesis de trabajo más plausible prevé que la determinación por un destino neurogénico o por un destino epidérmico ocurre mediante un proceso de comunicación celular: la señal epidermogenizante emitida por una célula es recibida por sus vecinas; propagada esa señal, se regula la actividad del genoma de la célula receptora de suerte que facilite el desarrollo del destino epidérmico.

Es muy posible que la base molecular subyacente al proceso de comunicación esté representada por la función de los genes neurogénicos, cuyos productos debieran proporcionar tanto la señal como el aparato receptor apropiado. Puesto que todos los genes neurogénicos participan en la cadena señal-receptor-regulación, la mutación sufrida por cualquiera de ellos ocasiona un trastorno en el proceso entero y conduce al mismo fenotipo.

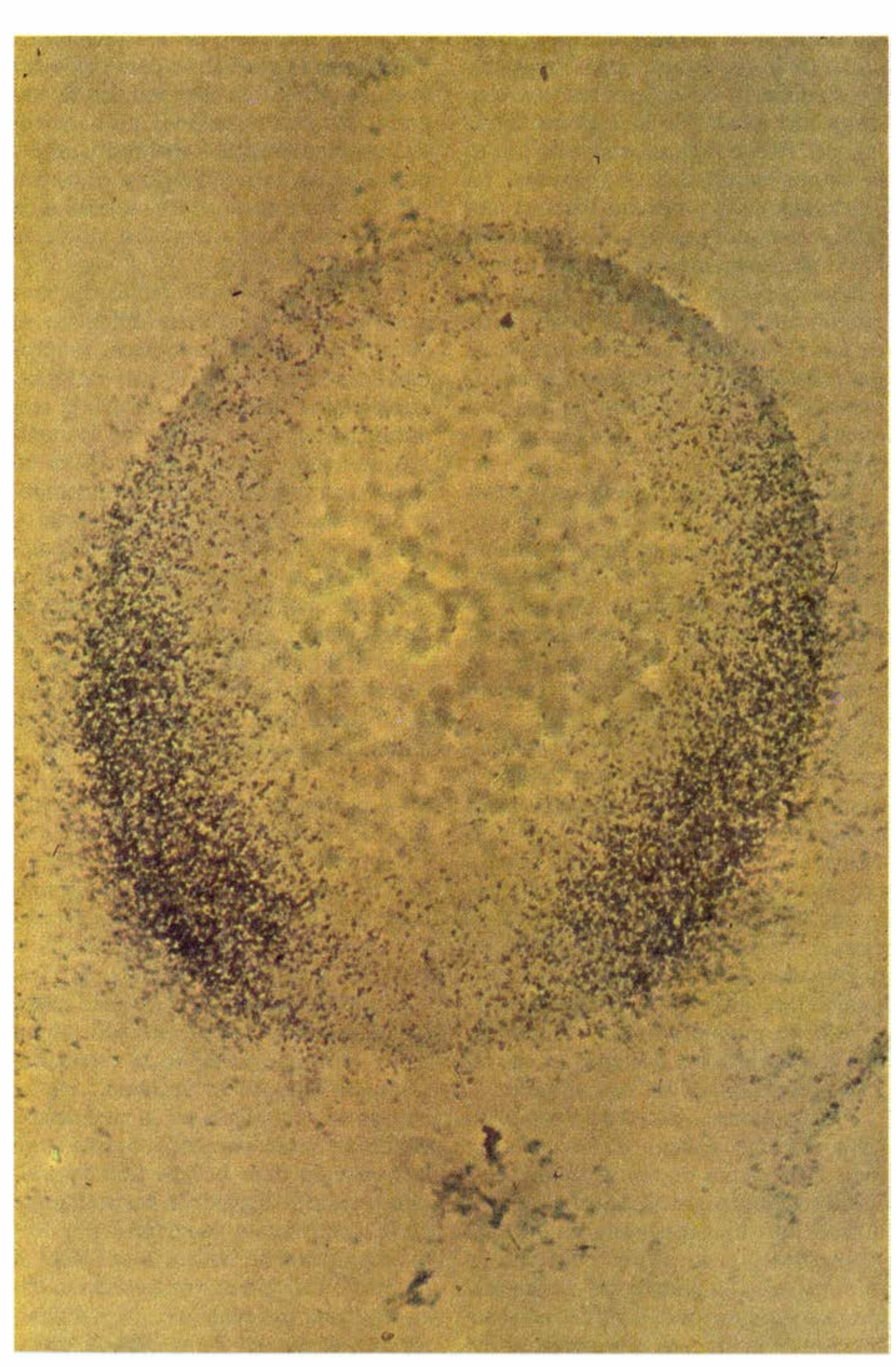
Formulada así la hipótesis, podemos interpretar los resultados de los trasplantes de células mutantes en el sentido siguiente: todos los genes neurogénicos, salvo *E(spl)*, pueden actuar en el proceso emisor de la señal epidermogenizante reguladora; el comportamiento de *E(spl)* es compatible con su intervención en el lado del receptor. Cuando se trasplanta una célula con una señal defectuosa, pero contando también con un receptor normal, en un ambiente normal, la célula trasplantada es capaz de responder normalmente a la señal emitida por sus vecinas y originar epidermis. Por contra, si trasplantamos una célula con un receptor defectuoso, ésta no puede responder a la señal de las células normales, y se desarrolla invariablemente en un neuroblasto.

Nuestra hipótesis recibe apoyo de lo que sabemos sobre las bases moleculares de la neurogénesis. En efecto, se han clonado ya cuatro genes neurogénicos. El gen *Notch* fue clonado por los grupos de Spyros Artavanis-Tsakonas, de la Universidad de Yale, y de Michael Young, de la Universidad Rockfeller. Miembros de nuestro equipo de la Universidad de Colonia han hecho lo propio con los genes *mam* (Detlef Weigel y Elisabeth Knust), *Dl* (Harald Vässin) y *E(spl)* (Elisabeth Knust). La presumible estructura de la proteína producida por *N* a partir de la secuencia del ADN citoplasmático, establecida recientemente por Artavanis-Tsakonas y sus colaboradores, ha dado a conocer una organización sumamente interesante y reveladora. Un ARN mensajero de casi 10,5 kilobases se traduce en una proteína de membrana de 2703 aminoácidos, en la que se distinguen tres territorios: uno intracelular, otro transmembranal y un tercer territorio extracelular. Este último posee una región con 36 repeticiones de una secuencia determinada, que muestra ser homóloga con el factor epidérmico de crecimiento (FEC) y con otras muchas proteínas de mamífero. La estructura del gen *Dl* ha sido establecida parcialmente por nuestros colaboradores Bremer, Vässin y Knust, quienes han descubierto que la proteína codificada por este gen dispone también de los péptidos homólogos del FEC. Esta estructura habla en favor de la partipación de esos dos genes en los procesos de comunicación celular. No parece que los otros genes neurogénicos codifiquen tales péptidos.

Disponemos del ADN de algunos genes neurogénicos. Ello nos permite estudiar su pauta de transcripción en el embrión normal. A lo largo de los últimos años se han ido desarrollando técnicas de hibridación de ácidos nucleicos, ADN o ARN, en cortes histológicos corrientes, posibilitando el estudio espacial de la expresión genética en su nivel molecular. La técnica empleada por los autores se basa en la habilidad mostrada por el ARN complementario del gen específico sujeto a estudio en formar híbridos con sus homólogos. Estos híbridos se forman en aquellas células en las que se transcribe el gen. La localización de los híbridos y, por tanto, de los transcritos del gen se realiza mediante autorradiografía, que nos muestra la ubicación de la sonda molecular utilizada (una molécula de ARN) y de sus homólogos (otras moléculas de ARN). Con nuestros colegas Harald Vässin y Elisabeth Knust, en Colonia, hemos estudiado recientemente el patrón de transcrip-

ción de los genes *Dl* y *E(spl)*, respectivamente. El primero de ambos, *Dl*, se expresa exclusivamente en células de todos los territorios con capacidad neurogénica; es decir: en la región neurogénica durante el inicio del desarrollo y, más tarde, en los primordios de los órganos sensoriales de la epidermis. El segundo, *E(spl)*, se expresa ubicuamente, esto es, en regiones neurogénicas y no neurogénicas, durante fases tempranas del desarrollo.

El patrón espacial de transcripción de los genes neurogénicos resulta compatible con las funciones propuestas antes: con la del gen *Dl* en la emisión de la señal epidermogenizante; con la del gen *E(spl)*, en la recepción de dicha señal. La especificidad topológica parece venir determinada por la señal —la proteína codificada por el gen *Dl*—; dicho de otra manera, la señal se emite sólo en territorios embrionarios dotados de capacidad neurogénica. Investigaciones futuras habrán de poner de manifiesto por qué la señal se emite exclusivamente por células con capacidades neurogénicas.



9. AUTORRADIOGRAFIA DE UN CORTE TRANSVERSAL del blastodermo, luego de la hibridación *in situ* con ARN complementario al ARN del gen *Delta*. (La sección dorsal corresponde a la parte superior de la fotografía.) Los granos indican la presencia de híbridos de ARN-ARN y, por consiguiente, de ARN específico de *Delta*, en las células subyacentes. El primordio del mesodermo y el de la epidermis dorsal carecen de híbridos. La fotografía fue obtenida por H. Vässin, del laboratorio de los autores del artículo en Colonia.

Moléculas de excitación visual

Cuando un bastón de la retina absorbe luz se desencadena una cascada de reacciones que culminan en el impulso nervioso. Se ha desentrañado ya el mecanismo molecular de ese fenómeno

Lubert Stryer

Vivimos tiempos apasionantes en las investigaciones sobre la visión. Hace muchos años, William A. H. Rushton, de la Universidad de Cambridge, escribió: "Las moléculas responden a la luz como las personas a la música. Algunas no absorben nada. Otras se limitan a mover un pie o un dedo. Pero también las hay que se levantan, bailan y cambian de pareja". Cuando Rushton redactó esas líneas su descripción era mera poesía: no se conocía con exactitud qué moleculas estaban implicadas en la respuesta a la luz de las células fotorreceptoras de la retina, ni cómo interactuaban las involucradas.

Sin embargo, en la última década, los experimentos realizados en muchos laboratorios (incluido el del autor) han identificado la base molecular de la excitación visual. Se conocen las moléculas que participan en la respuesta y se ha conseguido desentrañar el esquema de sus interacciones. Ese detallado trabajo bioquímico ha demostrado la clarividencia de Rushton. Ciertamente, las moléculas que constituyen la base de la respuesta a la luz "se levantan, bailan y cambian de pareja" en una singular cascada que constituye el fundamento de la visión.

La cascada molecular que se ha dilucidado tan cuidadosamente en la pasada década reside en las células fotorreceptoras de la retina. Son esas células de dos tipos, denominados bastones y conos en razón de sus formas peculiares. Los bastones permiten formar imágenes en blanco y negro a iluminación tenue; los conos posibilitan la visión en color a iluminación brillante. La retina humana contiene tres millones de conos y cien de bastones. Las señales eléctricas que generan las procesan otras células retinianas antes de que se transmitan al cerebro a través del nervio óptico.

Despertaron mi interés por las bases moleculares de la visión ciertas propiedades de los bastones, muy llamativas. En su función de receptores, los bastones han alcanzado la máxima sensibilidad. Puede excitarlos un solo fotón, la menor cantidad de luz posible. La cascada de reacciones moleculares amplifica esa pequeñísima información hasta transformarla en señal útil para el sistema nervioso. Aún más, el grado de amplificación varía con la iluminación de fondo: los bastones son mucho menos sensibles en luz brillante que en luz tenue, y por consiguiente actúan con eficacia en un amplio margen de iluminación de fondo.

También me interesaban los propios bastones, con su exquisito sistema sensorial empaquetado en una subunidad celular diferente, que puede separarse y estudiarse con facilidad. El bastón es una estructura larga y delgada, dividida en dos sectores. El segmento externo contiene la mayor parte del aparato molecular de detección de la luz y de inicio del impulso nervioso. El interno está especializado en generar energía y renovar las moléculas necesarias para el segmento externo. Además, en este último se encuentra una terminal sináptica que proporciona la base de la comunicación con otras células. Si se agita suavemente una retina aislada, se desprenden los segmentos externos, pudiéndose analizar la maquinaria de excitación muy purificada. Propiedad que convierte a los bastones en un regalo apreciado por los bioquímicos.

El segmento externo del bastón es un tubo estrecho, relleno de una pila de unos 2000 discos de tamaño diminuto. Tubo y discos están constituidos por el mismo tipo de membrana en bicapa. Ahora bien, la membrana externa (o plasmática) y la membrana de los discos exhiben funciones distintas en la recepción de la luz y en la generación del impulso nervioso. Los discos apilados contienen la mayor parte de las moléculas proteicas que absorben la luz e inician la respuesta de excitación. La membrana externa sirve para convertir la señal química en eléctrica. En su mayoría, las investigaciones más recientes, que han obtenido resultados espectaculares, se han dedicado a desentrañar el proceso que une las moléculas de la membrana del disco con las de la membrana externa.

Entre las principales moléculas asociadas con la membrana del disco se cuenta la llamada rodopsina, la proteína fotorreceptora de los bastones, que absorbe un fotón y genera la respuesta inicial de la cadena de fenómenos que subyacen al sentido de la visión. La rodopsina tiene dos componentes, denominados 11-*cis* retinal y opsina. El 11-*cis* retinal es una molécula orgánica derivada de la vitamina A; la opsina es una proteína capaz de desempeñar funciones enzimáticas. La absorción de un fotón por parte del 11-*cis* retinal desencadena la actividad enzimática de la opsina y pone en movimiento la cascada bioquímica.

La opsina es una cadena polipeptídica constituida por 348 aminoácidos, cuya secuencia se determinó en los laboratorios de Yuri A. Ovchinnikov, del Instituto de Química Bioorgánica M. M. Shemyakin, de Moscú, y Paul A. Hargrave, entonces en la Universidad de Illinois del Sur. Esas investigaciones han proporcionado abundante información sobre la estructura tridimensional de la proteína, que se encuentra embebida en la membrana del disco. Según parece, la opsina tiene la forma de siete hélices (del tipo alfahelicoidal), dispuestas verticalmente en la membrana y conectadas por cortos segmentos no helicoidales [*véase la figura 3*]. Unida a una hélice alfa se encuentra una molécula de 11-*cis* retinal, alojada cerca del centro de la membrana, con su largo eje alineado con el plano de la membrana.

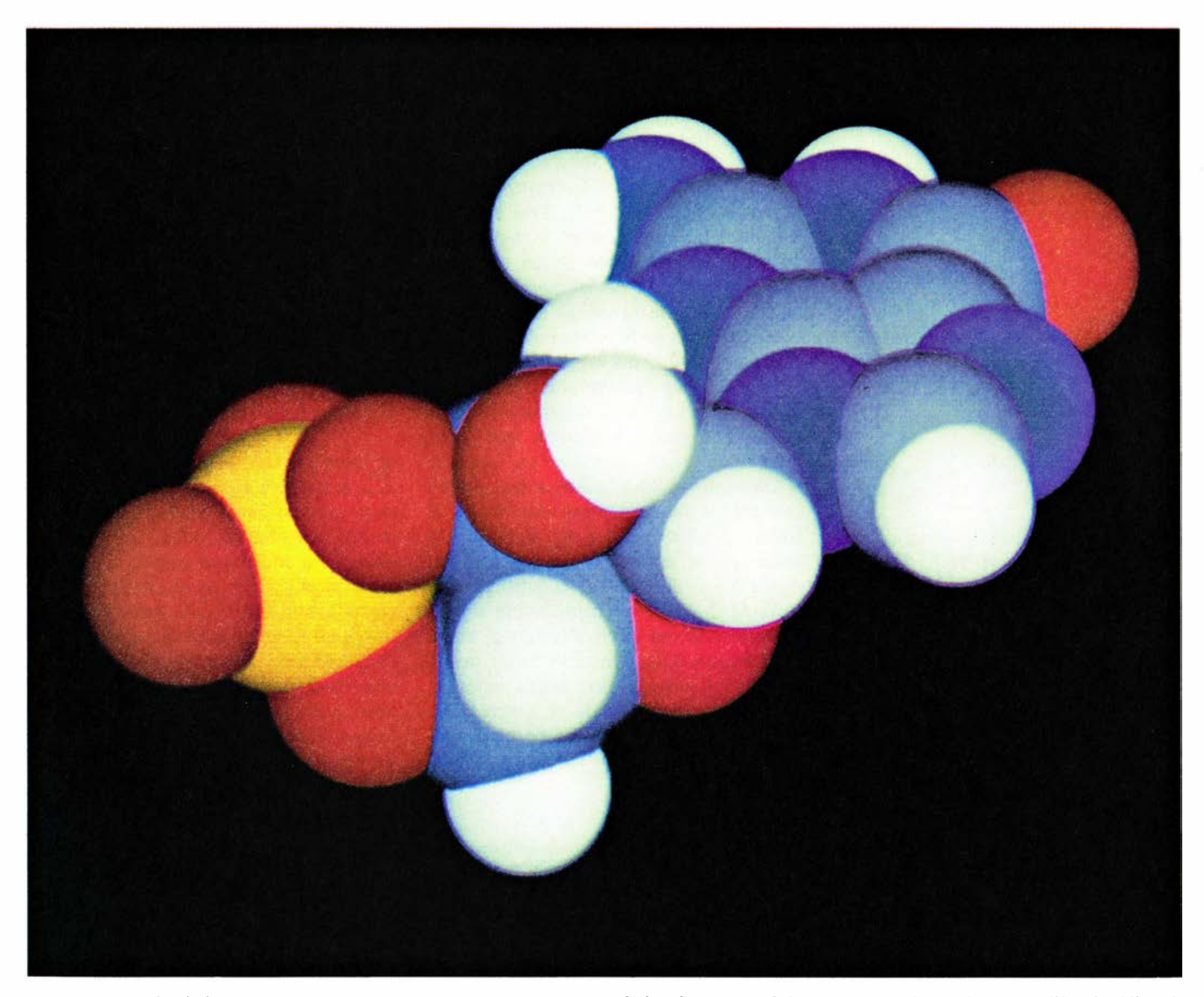
Tal ordenación rodea al retinal de un

ambiente proteico complejo y altamente estructurado. A ese ambiente (entre otros factores) cabe atribuir la "sintonización" que sufre el retinal por influencia sobre el espectro de radiaciones que puede absorber. El retinal en solución absorbe con máxima intensidad a una longitud de onda de 380 nanómetros (en la porción ultravioleta del espectro), mientras que la rodopsina lo hace a 500 nanómetros (en el verde). Ese desplazamiento resulta de gran interés funcional, pues iguala el espectro de absorción de la rodopsina con el de la luz que llega al ojo.

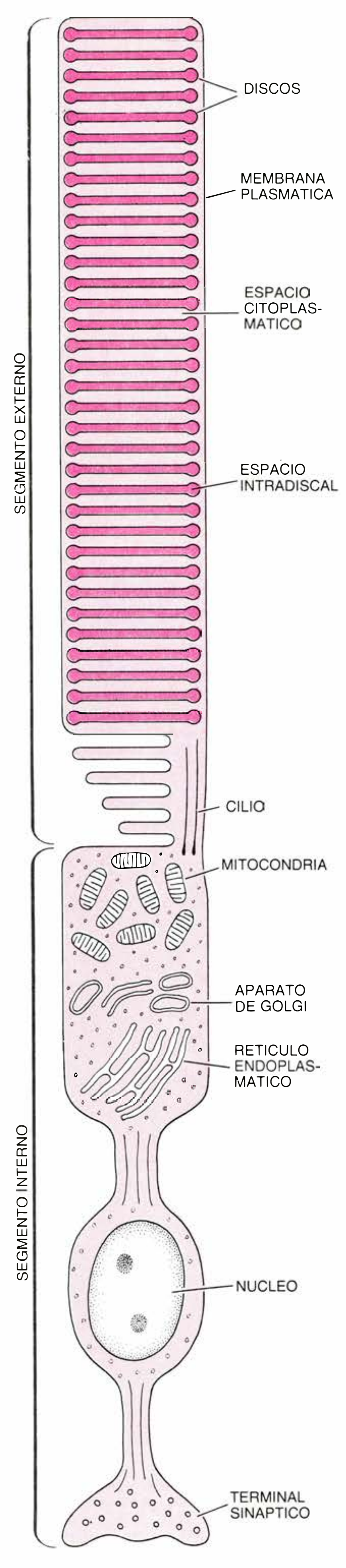
¿Qué sucede cuando el 11-*cis* retinal absorbe un fotón? La respuesta general es que la molécula se isomeriza. Se denominan isómeros las moléculas que tienen los mismos átomos aunque diferentes formas. Así, la designación 11-*cis* corresponde a un isómero particular del retinal. La estructura del retinal es una cadena de átomos de carbono; 11-*cis* indica que los átomos de carbono enlazados a los átomos de carbono 11 y 12 se encuentran en el mismo lado de la cadena. Configuración que obliga a la cadena a doblarse entre los carbonos 11 y 12. En otro isómero, el todo-*trans* retinal, los hidrógenos unidos a los carbonos 11 y 12 se disponen uno frente al otro y el esqueleto hidrocarbonado es recto.

En 1957, George Wald y Ruth Hubbard, de la Universidad de Harvard, identificaron el paso molecular inicial de la visión; demostraron que, cuando el 11-*cis* retinal absorbe un fotón, adopta la configuración todo-*trans*. La energía luminosa endereza la curva de la cadena de átomos de carbono. La sensibilidad de la rodopsina a ese fenómeno resulta notable: la mitad de las veces que se absorbe un fotón se produce esa isomerización. Por el contrario, la isomerización espontánea en oscuridad se registra alrededor de una vez cada 1000 años. Las consecuencias de tal diferencia resultan especialmente valiosas para la visión. Cuando un fotón incide en la retina, la rodopsina que lo recibe informa del hecho con gran eficacia, mientras que los restantes millones de moléculas de rodopsina de la célula permanecen en silencio.

Transcurrida ya una década larga desde el trabajo de Wald y Hubbard, conocemos también mejor los procesos que ocurren al final de la cascada excitadora de la membrana externa. La membrana plasmática posee permeabilidad selectiva a los iones, que llevan carga eléctrica neta. Existe, por tanto, una diferencia de potencial eléctrico



1. GMP CICLICO (3′,5′ guanosín monofosfato cíclico) es el transmisor que actúa en los bastones de la retina, responsable directo de la generación del impulso nervioso. Está formado por átomos de carbono (*azul oscuro*), nitrógeno (*azul claro*), hidrógeno (*blanco*), oxígeno (*rojo*) y fósforo (*amarillo*). El átomo de fósforo forma parte de la estructura anular por la que se califica de cíclica a la molécula. Cuando el anillo está intacto, el GMP cíclico mantiene abiertos los canales de iones sodio de la membrana externa del bastón; cuando se escinde, los canales se cierran y se alteran las propiedades eléctricas de la membrana.



entre el interior y el exterior del bastón. En estado de reposo, el interior de la célula es unos 40 milivolt (mV) más negativo que el exterior. En 1970, los experimentos electrofisiológicos que realizaron con suma pericia Tsuneo Tomita, de la Universidad de Keio, y William A. Hagins y Shuko Yoshikami, de los Institutos Nacionales estadounidenses de la Salud, mostraron que, después de la iluminación, la diferencia de potencial aumentaba. El incremento variaba en función de la intensidad del estímulo y la iluminación de fondo; la máxima diferencia de potencial era de −80 mV.

El incremento de la diferencia de potencial, denominado hiperpolarización, responde al descenso de la permeabilidad de la membrana a los iones sodio (que portan carga positiva). Conocida ya la naturaleza general de la hiperpolarización, mi colega Denis A. Baylor demostró que la absorción de un solo fotón bloqueaba la entrada de millones de iones sodio, pues provocaba el cierre de centenares de canales de sodio de la membrana plasmática [véase "Respuesta de los fotorreceptores a la luz", por Julie L. Schnapf y Denis A. Baylor; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio de 1987]. Tras el cierre de los canales de sodio, la hiperpolarización inducida por la luz se transmite, a lo largo de la membrana externa, hasta la terminal sináptica del otro extremo de la célula, donde se genera el impulso nervioso.

Esos datos fundamentales, correspondientes a ambos extremos de la cascada biológica, planteaban una árida cuestión: ¿qué sucedía en medio? ¿Cómo provocaba, la isomerización del retinal de la membrana del disco, el cierre de los canales de sodio de la membrana externa? La membrana plasmática del bastón constituye una unidad físicamente distinguible de las membranas del disco. Por tanto, algún transmisor debe llevar la señal desde los discos hasta la membrana externa. Ya que la absorción de un único fotón implica el cierre de centenares de canales de sodio, por cada fotón absorbido deben generarse muchos transmisores.

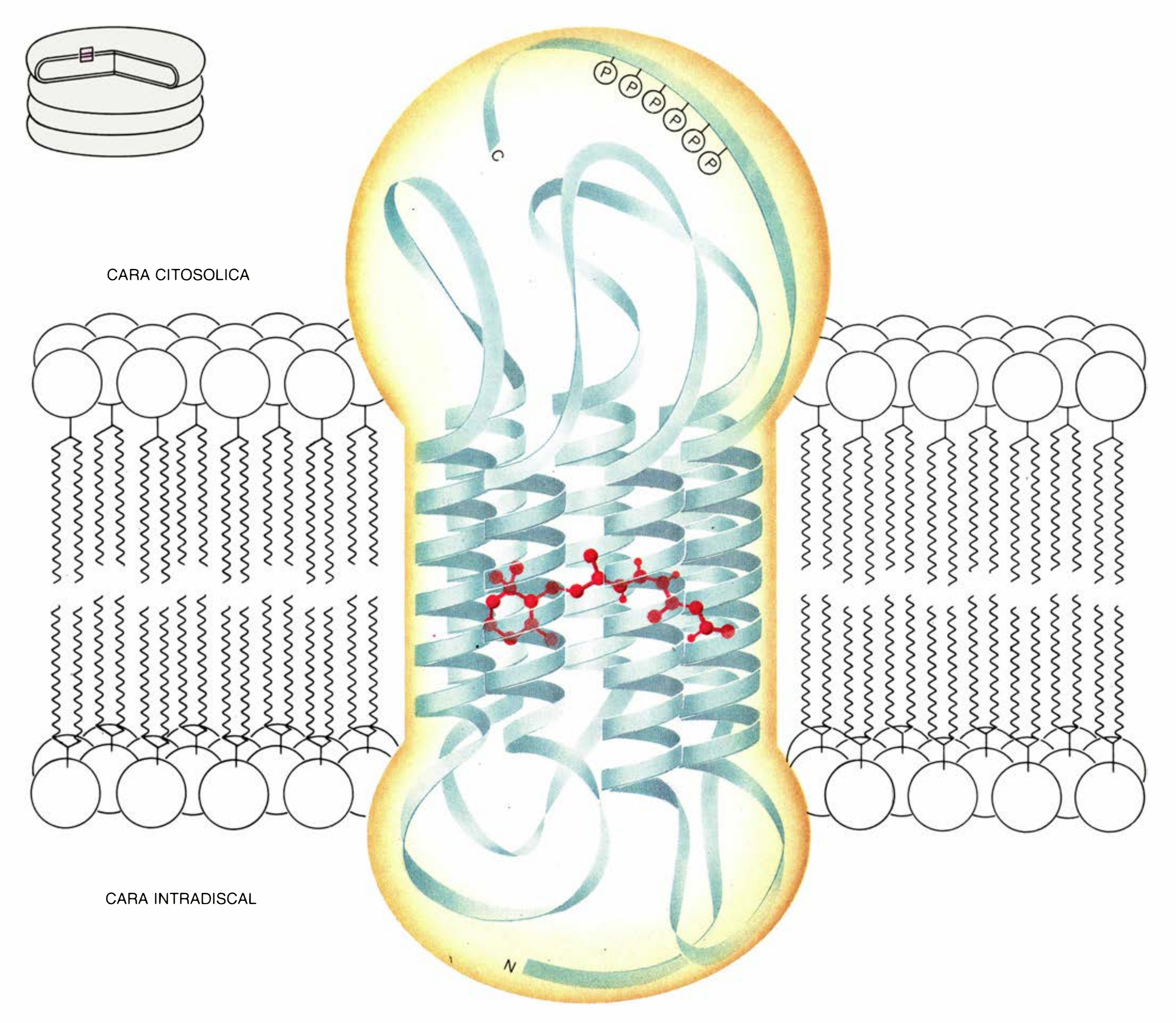
2. CELULA BASTON, dividida en dos partes, a las que corresponden funciones específicas. El aparato de detección de la luz se encuentra en el segmento externo, que contiene una pila formada por alrededor de 2000 discos derivados de la membrana plasmática. El segmento interno contiene los orgánulos donde se sintetizan las moléculas requeridas en la fotorrecepción. Cuando la luz incide en el disco se modifican esas moléculas. La señal se envía por medio de una cadena de reacciones hacia la membrana plasmática, por la que viaja hasta el terminal sináptico, desde donde parte hacia otras células retinianas.

¿Qué transmisor porta la señal excitadora? En 1973, Hagins y Yoshikami propusieron que los iones calcio, que en oscuridad se encontraban secuestrados en el disco, bajo iluminación se liberaban y se difundían a la membrana plasmática para cerrar los canales del sodio. La hipótesis, muy atractiva, suscitó gran interés y propició numerosos experimentos. Sin embargo, trabajos recientes han demostrado que, aunque el ion calcio desarrolla un importante papel en la visión, no es el transmisor de la excitación: lo es la molécula denominada 3′,5′ guanosín monofosfato cíclico, o GMP cíclico.

La capacidad del GMP cíclico para actuar como transmisor guarda una estrecha relación con su estructura química. El GMP es un nucleótido del tipo de los que constituyen las subunidades del ARN. Al igual que otros nucleótidos, tiene dos componentes: una base y un azúcar de cinco átomos de carbono. En el caso del GMP la base es la guanina; a los nucleótidos que contienen guanina se les conoce como guanil nucleótidos. El adjetivo cíclico indica que los carbonos 3′ y 5′ de la molécula del azúcar están unidos por un grupo fosfato. El enlace que une los dos carbonos −denominado enlace fosfodiéster− forma un anillo. Cuando el anillo está intacto, el GMP cíclico mantiene abiertos los canales de sodio de la membrana. Cuando lo degrada la enzima fosfodiesterasa, los canales de sodio se cierran espontáneamente.

Entre la excitación de la rodopsina y la ruptura enzimática del GMP cíclico median varias etapas. Cuando el retinal absorbe un fotón y se activa la opsina, la rodopsina activa la enzima transducina, cuya acción se determinó en mi laboratorio; esta proteína constituye un intermediario clave de la cascada excitadora. La transducina activa una fosfodiesterasa específica, que abre, a continuación, el anillo del GMP cíclico, insertando en él una molécula de agua (es decir, por hidrólisis). No cuesta delinear a grandes rasgos esa vía metabólica, pero su desciframiento y la interpretación de su significado fisiológico obligaron a realizar múltiples experimentos en distintos laboratorios.

En 1971 Mark W. Bitensky y William H. Miller, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Yale, encontraron que la luz disminuía significativamente el nivel de un nucleótido cíclico en los segmentos externos del bastón. Estudios posteriores demostra-



3. MOLECULA DE RODOPSINA. Embebida en la membrana del disco, recibe la luz e inicia la cascada excitadora. Igual que la membrana plasmática, de la que procede, la membrana del disco es una bicapa de moléculas lipídicas (grasas). La rodopsina presenta dos componentes: el 11-*cis* retinal y la opsina, proteína ésta configurada en siete estructuras helicoidales, arrolladas dentro de la membrana y conectadas por cortos segmentos lineales. El 11-*cis* retinal (*rojo*) se encuentra cerca del centro de la membrana, unido a una de las hélices. La absorción de un fotón (un cuanto de luz) por parte del retinal altera su configuración y activa la rodopsina. Este modelo de estructura de la rodopsina lo han propuesto Edward Dratz, de California, y Paul Hargrave, de Illinois.

ron que la reducción se debía a la hidrólisis de GMP cíclico por parte de una fosfodiesterasa específica para ese nucleótido. Sin embargo, la hipótesis del calcio gozaba por entonces de amplia aceptación, y no parecía en absoluto que el GMP cíclico ejerciera una influencia directa destacable en la respuesta excitadora. Por fin, en los últimos años de la década de 1970 se realizaron dos descubrimientos decisivos; de ellos derivaría mi interés en el GMP cíclico como un posible candidato a transmisor.

En una conferencia dictada en el verano de 1978, Paul A. Liebman, de la Universidad de Pennsylvania, comentó su descubrimiento de que, en preparaciones de segmentos exteriores de bastones, un solo fotón podía desencadenar la activación de centenares de moléculas de fosfodiesterasa por segundo. En trabajos anteriores, el nucleótido adenosín trifosfato (ATP) había demostrado una capacidad de amplificación mucho menor; Liebman observó que la amplificación instada por el guanosín trifosfato (GTP) era muy superior incluso.

Es ése un nucleótido estrechamente emparentado con la configuración acíclica del GMP. No presenta un único grupo fosfato unido a su carbono 5′, sino una cadena de tres fosfatos unidos entre sí por enlaces fosfodiéster. La energía almacenada en esos enlaces resulta fundamental en muchas funciones celulares. Por ejemplo, la eliminación de un grupo fosfato convierte el GTP en guanosín difosfato (GDP) y libera gran cantidad de energía. De ese modo obtiene la célula la energía necesaria para llevar a cabo reacciones químicas que, de no ocurrir tal, resultan energéticamente desfavorables. La clave del descubrimiento de Liebman era que ese mismo proceso parecía intervenir en la activación de la fosfodiesterasa, donde el GTP constituye un cofactor esencial.

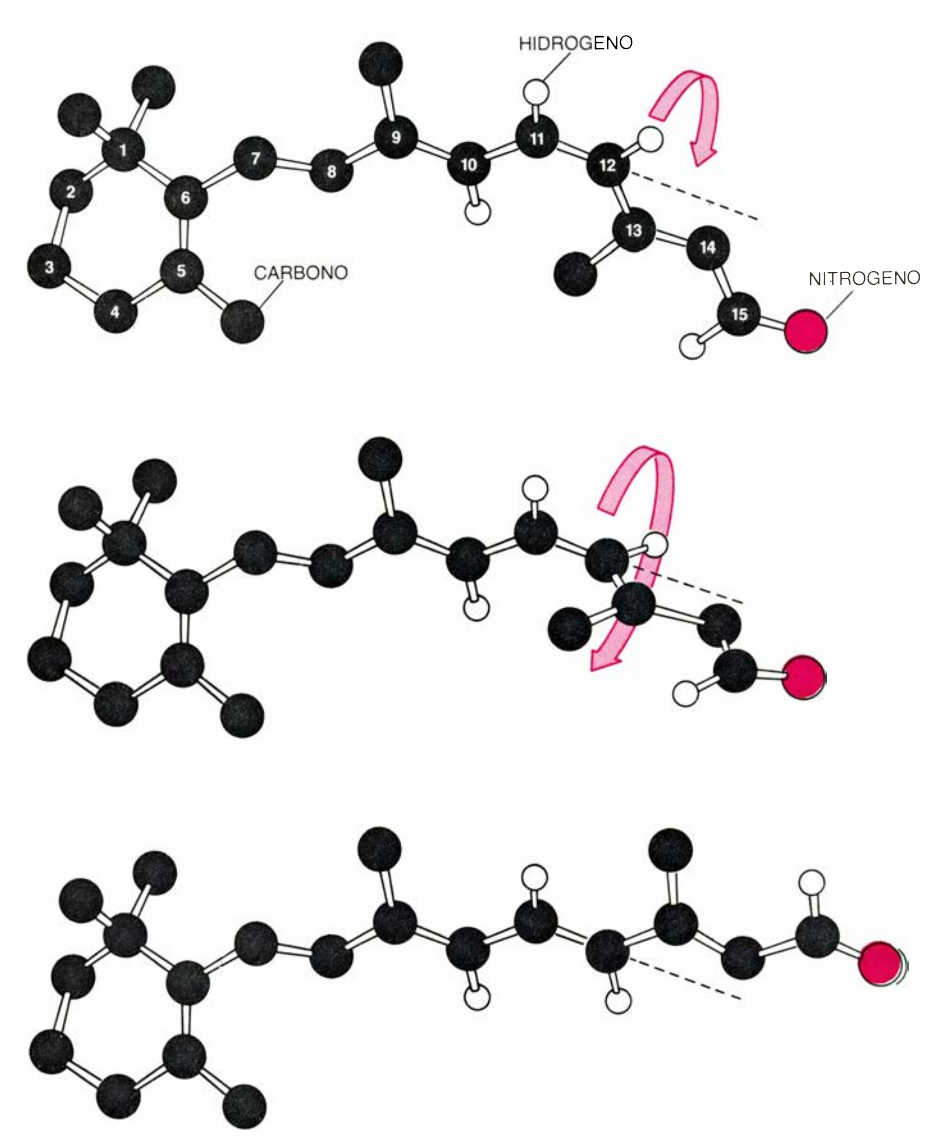
En el viaje de vuelta a casa. tras asistir a la conferencia donde Liebman había presentado sus descubrimientos, pasé por Yale, con la buena fortuna de pernoctar en casa de Miller. Después de una excelente cena me mostró varios resultados experimentales de gran

interés. Miller y su colega Grant Nicol habían inyectado con éxito GMP cíclico en el segmento externo de bastones intactos. Los resultados eran sorprendentes. El GMP cíclico reducía rápidamente la diferencia de potencial a través de la membrana plasmática. Y no sólo eso, el nucleótido inyectado alargaba drásticamente el retraso entre la llegada de un pulso de luz y la hiperpolarización de la membrana. La interpretación más sencilla era que el GMP cíclico abría los canales de sodio, que luego permanecían abiertos hasta que la fosfodiesterasa activada por la luz degradaba el GMP cíclico.

La hipótesis resultaba fascinante, pero no se disponía de ninguna prueba directa. Al volver a mi laboratorio, le hablé de los nuevos hallazgos a Bernard K.-K. Fung, becario de postdoctorado. Fung compartió mi entusiasmo en otorgar al GMP cíclico el papel de transmisor. Juntos decidimos explorar el mecanismo molecular por el que se activa la fosfodiesterasa que degrada el GMP cíclico. En nuestro planteamiento influyó sobremanera el descubrimiento de Liebman según el cual el GTP resultaba necesario para que se registrara la activación, pues sugería la importante intervención de una proteína capaz de unirse al GTP. Empezamos a indagar qué le sucedía al GTP en los bastones.

Nuestro primer experimento se diseñó para detectar la unión del GTP y sus derivados químicos con los segmentos externos del bastón. Se incubó GTP marcado radiactivamente con fragmentos de segmentos externos de bastones. Al cabo de varias horas, se lavó la preparación sobre un filtro que retenía los fragmentos de membrana o macromoléculas, como las proteínas, si bien permitía el paso de micromoléculas, como el GTP (y sus parientes). Encontramos que, unida a la membrana, había gran cantidad de radiactividad. Investigaciones posteriores mostraron, sin embargo, que la molécula unida a la membrana no era GTP sino GDP.

Los resultados sugerían sin ambages la presencia de alguna proteína de las membranas de los bastones capaz de unirse al GTP y de convertirlo en GDP, por ruptura de uno de sus grupos fosfato. Parecía cada vez más probable que tal proteína fuese un intermediario clave, así como que la conversión de GTP en GDP provocara la activación. Mientras se realizaban esos trabajos, Walter Godchaux III y William F. Zimmerman, del Amherst College, publicaron el hallazgo de esa proteína en las membranas del bastón. Pero no estaba claro cómo encajaban sus descubrimientos con las piezas del rompecabezas que empezaban ya a emerger.



4. SE ALTERA LA CONFIGURACION del retinal después de absorber un fotón. En oscuridad (*arriba*) el 11-*cis* retinal se dispone de tal modo que los átomos de hidrógeno unidos a los carbonos 11 y 12 se encuentran en el mismo lado del esqueleto carbonado, lo que obliga al esqueleto a doblarse. La absorción de un fotón provoca el giro de la cadena entre los carbonos 11 y 12, rotación que endereza el extremo de la cadena y rinde una forma química distinta: el todo-*trans* retinal (*abajo*). (Dibujos de George V. Kelvin, Science Graphics.)

Uno de los aspectos más sorprendentes de la actividad que Fung y yo habíamos observado era que en la membrana no sólo había algo capaz de unirse a los guanil nucleótidos, sino que, por otra parte, cuando se iluminaban las membranas, se liberaba GDP. Además, la liberación de GDP de la membrana crecía manifiestamente ante la presencia de GTP en la solución circundante. Empezaba a esbozarse una hipótesis que simplificaría ese revoltijo de datos. Por lo que parecía, en alguna fase del proceso de activación desarrollado en la membrana se intercambiaba GDP por GTP. De ahí que el GTP incrementara de modo tan notable la liberación de GDP: la liberación de una molécula de GDP dependía de la sustitución de un GTP por ella. Posteriormente, quizás el GTP se convirtiera en GDP.

El intercambio de GDP por GTP parecía, cada vez más, encontrarse cerca del núcleo del proceso de activación; y ello por la importante amplificación a que estaba sometido. Medimos el efecto de la luz en la toma de GTP por parte de la membrana y encontramos que la fotoexcitación de una molécula de rodopsina provocaba la unión de unas 500 moléculas de un análogo del GTP (elegido porque se resistía a transformarse en GDP y, por tanto, nos permitía aislar la etapa del intercambio). El gran interés que ofrecía el descubrimiento de esa amplificación residía en que apuntaba una explicación de la amplificación general que caracterizaba a la cascada excitadora.

El hallazgo, de importancia fundamental, nos llevó a proponer que en la

cascada de excitación había un intermediario proteico que podía encontrarse en dos estados. En uno, la proteína se unía al GDP; en el otro, al GTP. La sustitución de GDP por GTP constituía la señal que desencadenaba la activación de la proteína; el intercambio estaba acelerado por la rodopsina; a su vez, servía para activar una fosfodiesterasa específica. Seguidamente la fosfodiesterasa cerraba los canales de sodio de la membrana plasmática por degradación de GMP cíclico. Reproduciendo las investigaciones de Hermann Kühn, del Instituto de Neurobiología de la Universidad de Jülich, pronto aislamos la postulada proteína. Se le dio el nombre de transducina, en reconocimiento a su función mediadora de la conversión de luz en impulso eléctrico, es decir, en la transducción. Investigaciones posteriores demostraron que la transducina constaba de tres subunidades proteicas, designadas alfa, beta y gamma.

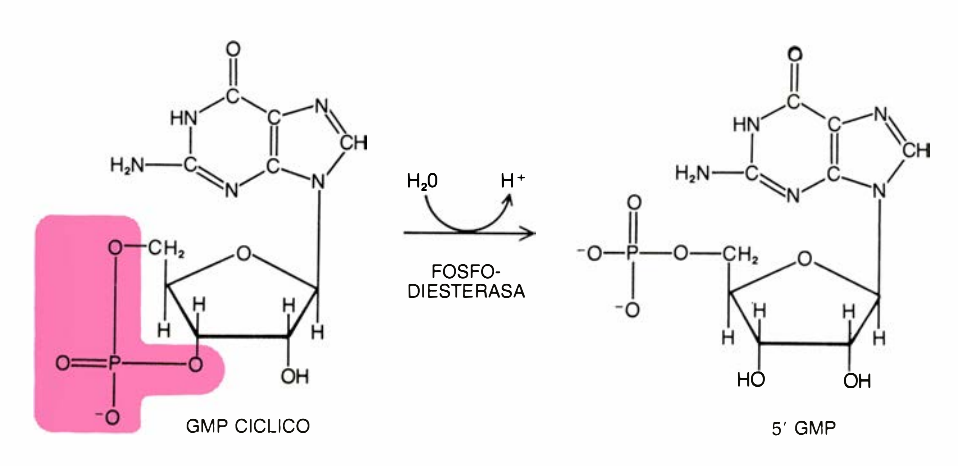
Disponiendo ya de la transducina purificada, podíamos comprobar nuestra hipótesis sobre el flujo completo de información en la cascada de activación. Según habíamos sugerido, la señal se trasladaría desde la rodopsina activada hasta la transducina (en su forma GTP) y luego hasta la fosfodiesterasa. Si el guión era correcto, cabía someter a ensayo dos supuestos: en primer lugar, que la transducina podría convertirse en su forma GTP en ausencia de la fosfodiesterasa. Y también, que la fosfodiesterasa podría activarse en ausencia de rodopsina fotoexcitada.

El autor y sus colegas se pusieron a comprobar ambas proposiciones. Para verificar la primera se obtuvo un sistema de membrana sintética que carecía de fosfodiesterasa. Se introdujo en esas membranas transducina purificada, en su forma GDP, y se comprobó que, al excitarse la rodopsina con luz, cada molécula de rodopsina catalizaba la adición a la membrana de 71 moléculas de un análogo del GTP. Parecía, por tanto, que las moléculas de rodopsina catalizaban el intercambio de GDP por GTP en gran número de moléculas de transducina, activándolas. Por primera vez se había encontrado un efecto amplificado de la rodopsina que sólo requería la presencia de otra proteína (la transducina).

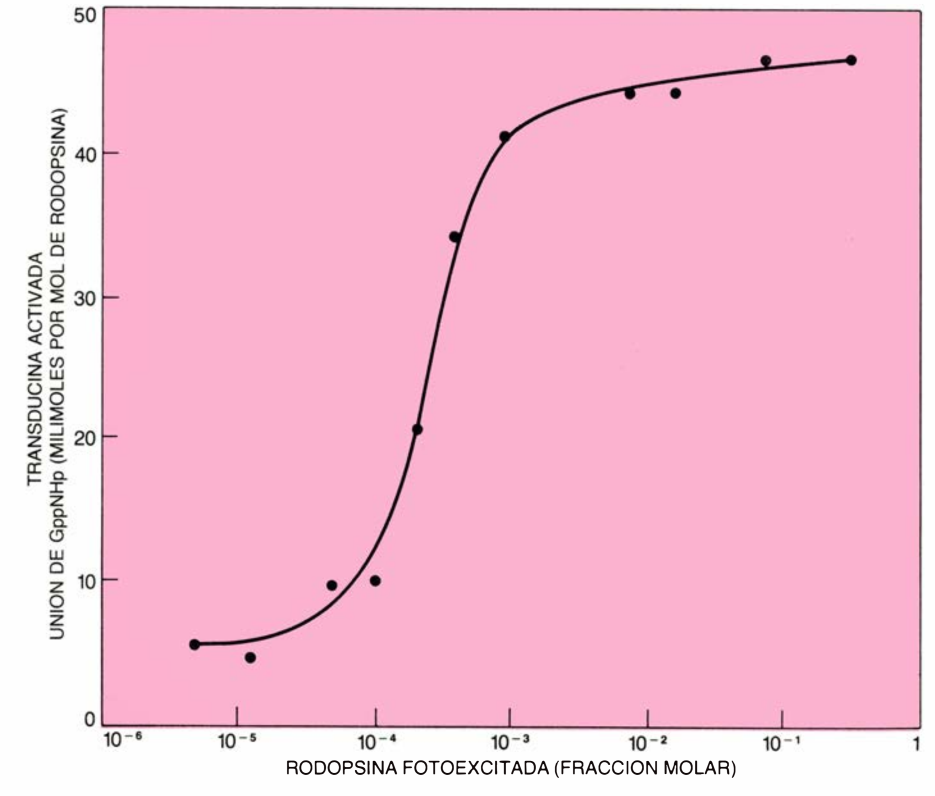
Quisimos entonces comprobar la segunda hipótesis: que la transducina en forma GTP podía activar la fosfodiesterasa en ausencia de rodopsina fotoexcitada. Había que empezar por purificar la forma activa de la enzima: el complejo transducina-GTP. Al efectuar ese paso nos llevamos una sorpresa. Sabíamos que, en su forma inactiva (GDP), la transducina se hallaba completa; las tres subunidades aparecían juntas. Sin embargo, en la forma activa (GTP) la transducina estaba disociada. La subunidad alfa se separaba de las unidades beta y gamma, que se mantenían unidas. El GTP se unía a la subunidad alfa.

Nos encontrábamos entonces preparados para plantear una cuestión más precisa todavía que la que se había previsto formular. ¿Cuál de las subunidades estimula la acción de la fosfodiesterasa, la alfa (que está unida al GTP) o la beta? Obtuvimos una respuesta decisiva. La subunidad alfa (con GTP) activa la fosfodiesterasa; la unidad formada por el complejo beta-gamma no ejercía efecto alguno. Además, la unidad alfa se mostraba eficaz en ausencia de rodopsina, corroborando la idea de que la transducina podía activar la fosfodiesterasa sin rodopsina y confirmando nuestro esquema del flujo de información.

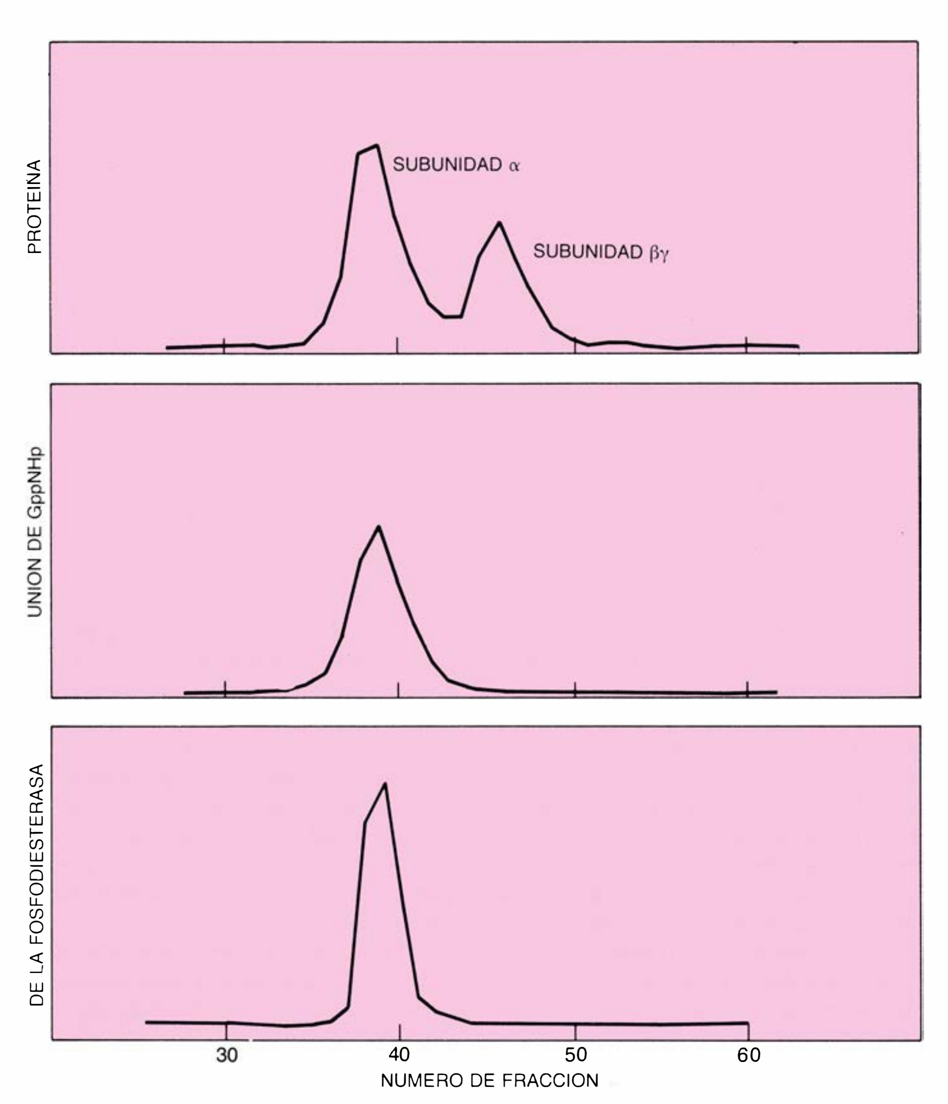
¿Por medio de qué mecanismo activaba la transducina a la fosfodiesterasa específica? El grupo de Bitensky en-



5. ANILLO DEL GMP CICLICO, que la fosfodiesterasa abre. El anillo (*color*) lo forma un átomo de P unido por un enlace fosfodiéster. La enzima inserta agua en el enlace, rompiéndolo y rindiendo 5′ GMP.



6. ACTIVACION DE LA TRANSDUCINA, que va acompañada de la unión de guanosín trifosfato (GTP). El eje horizontal muestra la concentración de rodopsina fotoexcitada (que aumenta hacia la derecha). El eje vertical manifiesta la unión del GppNHp (un análogo del GTP) a fragmentos de membrana artificial que sólo contienen rodopsina y transducina. La pendiente indica que, en este sistema, cada molécula de rodopsina activa 71 moléculas de transducina. (En bastones intactos se activan 500 moléculas de transducina por cada rodopsina). La transducina activada estimula a la fosfodiesterasa, que degrada el GMP cíclico.



7. SUBUNIDAD ALFA DE LA TRANSDUCINA, el transportador de información para la activación de la fosfodiesterasa. La transducina posee tres subunidades: alfa, beta y gamma. Las tres gráficas muestran el resultado obtenido al pasar una solución de transducina a través de una columna de filtración. El eje horizontal corresponde a las fracciones, iguales, de líquido recolectadas a la salida de la columna. El panel superior muestra que la proteína en solución tiene dos componentes de diferente tamaño. El componente pequeño es la subunidad alfa; el grande corresponde a la unidad constituida por uniones beta-gamma. El panel del centro refleja que la actividad de unión del GppNHp se encuentra asociada a la subunidad alfa. El panel inferior muestra que también la activación de la fosfodiesterasa se halla asociada a la subunidad alfa.

contró que, en oscuridad, la actividad de la fosfodiesterasa era baja, pues la constreñía un inhibidor. Cuando se añadía una pequeña cantidad de tripsina (una sustancia que digiere proteínas), se eliminaba el freno y se activaba la enzima. Según se sabía, la fosfodiesterasa constaba de tres cadenas polipeptídicas que, como en el caso de la transducina, recibían los apelativos de alfa, beta y gamma. James B. Hurley, becario de postdoctorado de mi laboratorio, descubrió que la tripsina degradaba la subunidad gamma, pero no las unidades alfa o beta. Reuniendo los resultados de Bitensky y de Hurley parecía probable que el inhibidor de la fosfodiesterasa fuera la subunidad gamma.

Así lo confirmaron los resultados obtenidos en varios laboratorios, entre ellos el del autor; éste, junto con sus colaboradores, purificó la subunidad gamma, la añadió al complejo alfa-beta activo y comprobó que la gamma suprimía más del 99 por ciento de la actividad catalítica. Se obtuvo una confirmación ulterior al comprobarse que el ritmo de destrucción de la unidad gamma por parte de la tripsina guardaba gran similitud con el de activación de la fosfodiesterasa en la cascada excitadora. Finalmente, Marc Chabre y sus colegas, en el Centro de Estudios Nucleares de Grenoble, encontraron que la transducina en forma de GTP podía unirse a la subunidad gamma de la fosfodiesterasa y formar con ella un complejo.

El esquema que se deduce de esos resultados es que, después de la iluminación, la subunidad alfa de la transducina, unida a un GTP, se une a la fosfodiesterasa y se lleva consigo la subunidad gamma, inhibidora. La salida de ésta desata la potente actividad catalítica de la fosfodiesterasa: cada molécula de enzima activada puede hidrolizar 4200 moléculas de GMP cíclico por segundo.

Esos nuevos datos aclararon gran parte de la cascada de activación. El primer paso consistía en la activación de la transducina por parte de la rodopsina fotoexcitada. En esa interacción, la rodopsina liberaba el GDP unido a la transducina, cuyo lugar ocupaba una molécula de GTP; la subunidad alfa se disociaba del resto de la proteína, llevándose con ella el GTP. Como demostró Chabre, en colaboración con T. Minh Vuong, alumno de licenciatura, durante una estancia sabática en mi laboratorio, el proceso entero duraba sólo alrededor de un milisegundo. La producción de centenares de complejos activos alfa-transducina-GTP por parte de una única rodopsina constituye el primer estadio de la amplificación en la visión.

Luego, la alfa-transducina con su GTP desencadenan la actividad de la fosfodiesterasa. En este estadio no hay amplificación: cada unidad alfa-transducina se une a, y activa, una sola fosfodiesterasa. La pareja transducina-fosfodiesterasa actúa de subunidad exclusiva para proporcionar el segundo estadio de activación. La transducina permanece asociada a la fosfodiesterasa mientras escinde el GMP cíclico. Como se ha descrito, cada molécula de enzima activada puede degradar varios miles de GMP cíclico. Tal amplificación, junto con la activación de varias transducinas por cada rodopsina, explica la notable amplificación de un solo fotón en un impulso nervioso genuino.

Sin embargo, para que el organismo vea en más de una ocasión debe detenerse el ciclo. Igual que en la activación, la transducina desempeña un papel fundamental en la desactivación. La subunidad alfa lleva incorporado un temporizador químico que interrumpe el estado activado, convirtiendo el GTP en GDP. No se conoce en detalle el mecanismo de ese temporizador, si bien se sabe que la hidrólisis del GTP en GDP durante la fase de desactivación desempeña una importante misión en el impulso del ciclo entero. Las reacciones de activación resultan energéticamente favorables, pero no es ese el caso de algunas reacciones de desactivación; sin la conversión del GTP en GDP no puede comenzar de nuevo el sistema para excitaciones ulteriores.

A la vez que se degrada el GTP en GDP, la subunidad alfa de la transducina libera la unidad inhibidora gamma

de la fosfodiesterasa, que retorna a la fosfodiesterasa, se une a ella y la devuelve al estado de reposo. Entonces, la transducina retorna a su estado de preactivación, reasociándose la subunidad alfa con la unidad beta-gamma. La rodopsina se desactiva por medio de una enzima que reconoce su estructura específica; la enzima, una quinasa, une numerosos grupos fosfato a los aminoácidos de un extremo de la cadena de opsina. A continuación, como demostró Kühn, la rodopsina forma un complejo con la arrestina, proteína esta que bloquea la unión de la transducina y devuelve el sistema al estado de oscuridad.

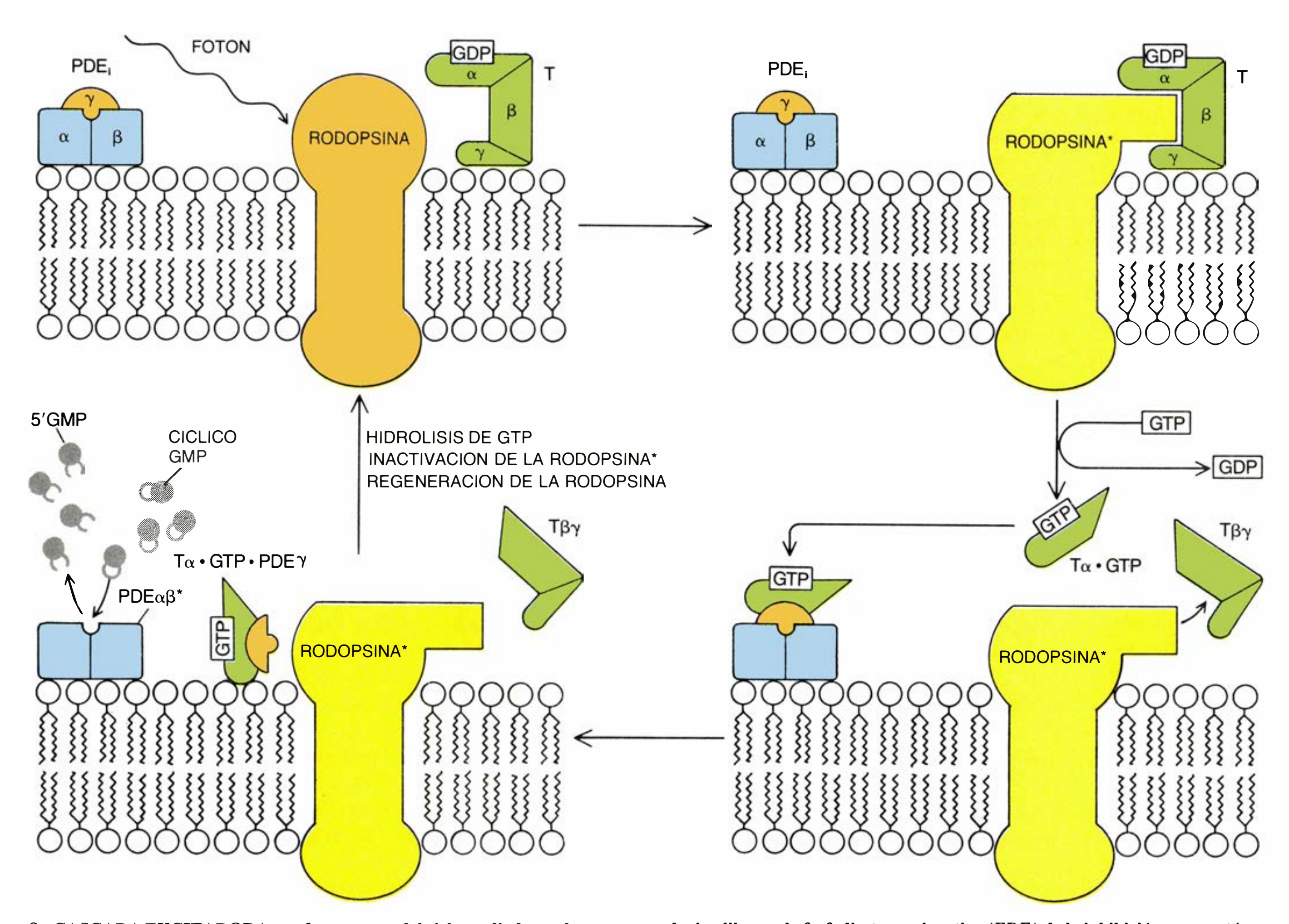
En su mayor parte, el desciframiento de la cascada visual que se efectuó entre finales de la década de 1970 y principios de la de 1980 se apoyó en dos supuestos: el GMP cíclico abría los canales de sodio de la membrana externa y la hidrólisis de GMP cíclico posibilitaba su cierre. Sin embargo, se conocía muy mal el mecanismo de acción de ese proceso. ¿Actuaba directamente el GMP cíclico sobre los canales o lo hacía a través de intermediarios? Evgeniy E. Fesenko y sus colegas, del Instituto de Física Biológica de Moscú, obtuvieron en 1985 una respuesta decisiva.

Valiéndose de una micropipeta, Fesenko retiró un fragmento de membrana plasmática del bastón. El pedazo se adhirió firmemente a la punta de la pipeta, mirando hacia fuera el lado que normalmente se dispondría hacia el interior de la célula. Expuso luego esa cara de la membrana a varias soluciones, para comprobar su efecto sobre la conductancia de sodio. Los resultados eran claros: el GMP cíclico abría directamente los canales, pero éstos no respondían a otras sustancias, ni siquiera al ion calcio.

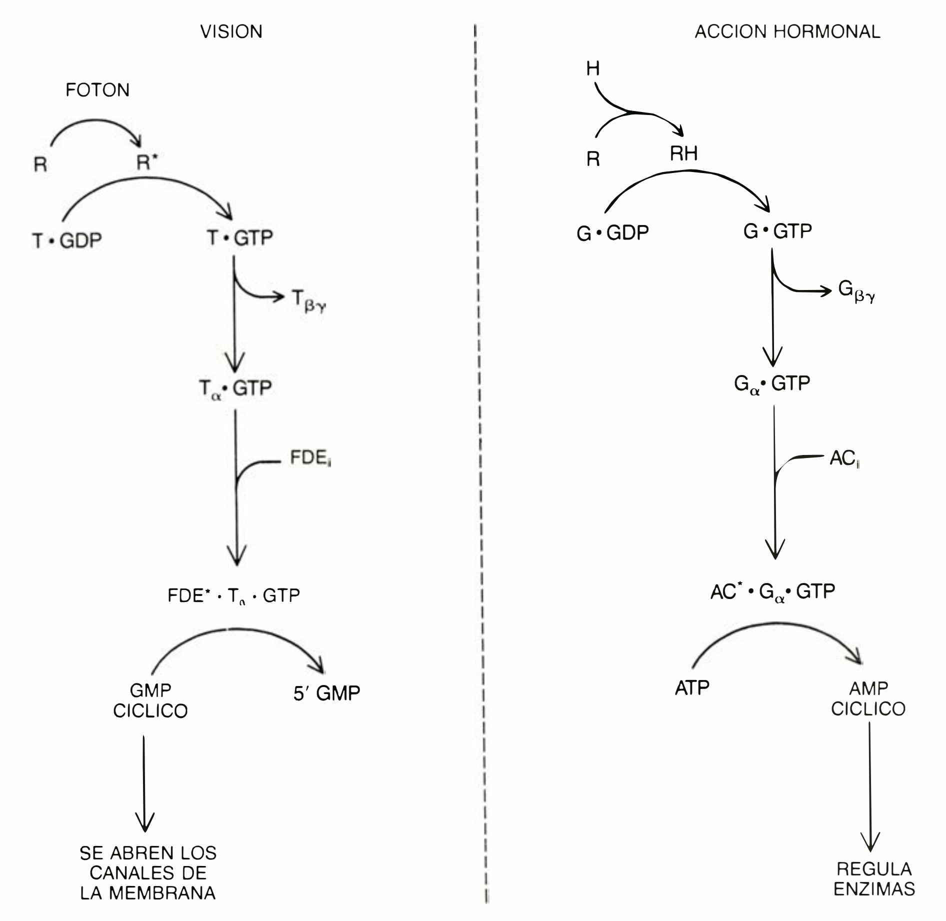
Los incisivos experimentos de Fesenko apuntillaron la hipótesis de que el transmisor excitador era el ion de calcio y establecieron el último eslabón de la cascada excitadora. Quedaba así trazado el esquema de la vía de excitación; según habíamos postulado, el flujo de información procedía de la rodopsina a la transducina, de ésta a la fosfodiesterasa y luego al GMP cíclico.

Dilucidar la vía por la que transcurre el mecanismo de la cascada excitadora había resultado muy gratificante, pero quedaban pendientes importantes cuestiones. Una de ellas era cómo se modulaba la cascada. Lo he dicho antes, los bastones resultan mucho menos sensibles en luz intensa que cuando se encuentran en la oscuridad. La iluminación de fondo debe afectar a la "ganancia" del sistema: la amplificación total proporcionada por los dos pasos amplificados (el de la rodopsina a la transducina y de la fosfodiesterasa al GMP cíclico). Muchas apuntan que el ion calcio está implicado en el proceso, pero se ignora cómo.

Otras cuestiones se refieren a la estructura de los canales de sodio y al mecanismo que evita el agotamiento final del GMP en la célula. Los grupos de



8. CASCADA EXCITADORA que forma parte del ciclo mediado por la transducina. El ciclo comienza con la absorción de un fotón por parte de la rodopsina (*arriba, a la izquierda*). Seguidamente, la rodopsina activada (*rodopsina) interactúa con la transducina (*T*), como se indica arriba, a la derecha. Esa interacción provoca la sustitución del GDP por GTP en la subunidad alfa de la transducina: determina también que la subunidad alfa se separe de la porción enzimática formada por el complejo beta-gamma (*abajo, a la derecha*). La transducina libera a la fosfodiesterasa inactiva (*FDE$_i$*) de la inhibición a que está sometida, quizás retirándole su subunidad gamma. La fosfodiesterasa activada empieza entonces a escindir gran número de moléculas de GMP cíclico (*abajo, a la izquierda*). Al poco, un temporizador adosado a la subunidad alfa de la transducina hidroliza el GTP en GDP. La subunidad alfa se reasocia con la unidad beta-gamma y se reensambla la fosfodiesterasa. Se inactiva la rodopsina, para recuperarse luego la configuración que presentaba antes de la activación.**



9. ACCION HORMONAL Y VISION muestran un sorprendente paralelismo. La secuencia de la izquierda va detallando la cascada excitadora de la visión y, la de la derecha, los efectos ejercidos por varias hormonas. La unión de una hormona (*H*) y su receptor (*R*), que forman un complejo hormona-receptor, guarda parecido con la excitación de la rodopsina. Del mismo modo que la rodopsina activa la transducina, el complejo hormona-receptor activa una proteína *G* estimuladora. Como en la activación de la transducina, la de la proteína *G* asegura la unión del GTP por parte de la subunidad alfa. La proteína *G* activa a la adenilato ciclasa (*AC*), una enzima análoga a la fosfodiesterasa. La adenilato ciclasa cataliza la conversión de adenosín trifosfato (ATP) en adenosín monofosfato cíclico (AMP cíclico), que regula, a su vez, distintas enzimas.

Liebman y Knaupp, del Instituto de Neurobiología de la Universidad de Osnabrück, Alemania Occidental, han aportado notables contribuciones a la primera de ellas; purificaron canales con puertas de GMP cíclico y reconstruyeron sus funciones en membranas modelo. En la respuesta a la segunda cuestión probablemente resulte decisiva la guanilato ciclasa, enzima que sintetiza GMP cíclico. Sin duda existe un bucle de retroalimentación que restablece los niveles de preiluminación del GMP cíclico; de lo contrario, tras excitarse unas pocas veces la célula agotaría para siempre su capacidad. Pero se desconoce todavía la naturaleza del bucle.

La investigación actual no se limita a buscar la solución de las cuestiones pendientes sobre la cascada visual en los bastones; trasciende el ámbito de esas células. Como ha demostrado Baylor, y también King-Wai Yau, de la Universidad Johns Hopkins, los conos poseen un sistema de transducción parecido al de los bastones. Se sabe desde hace tiempo que los conos contienen tres pigmentos visuales (análogos a la rodopsina) que responden a la luz roja, verde y azul. Los tres poseen 11-*cis* retinal. Además, recientes estudios de genética molecular realizados por mis colegas Jeremy Nathans y David S. Hogness han demostrado que presentan la misma arquitectura fundamental que la rodopsina. La transducina, la fosfodiesterasa y el canal controlado por GMP cíclico en los conos se asemejan a sus correspondientes en los bastones. No tardaremos mucho, pues, en entender el ciclo de transducción con el mismo detalle molecular que en los bastones.

La importancia de la cascada de GMP cíclico trasciende la visión. La cascada excitadora de los bastones guarda un notable parecido con el mecanismo de acción de ciertas hormonas. Por ejemplo, la hormona adrenalina insta la activación de la adenilato ciclasa, enzima que cataliza la síntesis de adenosín monofosfato cíclico (AMP cíclico). El AMP cíclico es un mensajero intracelular que media la acción de muchas hormonas [véase "Base molecular de la comunicación intracelular", por Michael J. Berridge; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, noviembre de 1985].

Alfred G. Gilman, del Hospital Clínico de la Universidad de Texas en Dallas, ha desentrañado muchos puntos de la regulación de la adenilato ciclasa, que presenta un sorprendente paralelismo con la cascada excitadora del bastón. Del mismo modo que la cascada excitadora se inicia cuando la rodopsina absorbe un fotón, la cascada de la acción hormonal da comienzo con la unión de una hormona específica a un receptor de la superficie celular. El complejo hormona-receptor interactúa luego con la proteína *G*, parecida a la transducina. El mismo intercambio de moléculas unidas que activa la transducina-GTP en lugar del GDP activa la proteína *G* cuando ésta interactúa con la unidad receptor-hormona.

El paralelismo no termina ahí. Al igual que la transducina, la proteína estimuladora *G* presenta tres subunidades; y la subunidad alfa es la que activa la adenilato ciclasa, valiéndose de la eliminación de un efecto inhibidor. Una vez más, como en el caso de la transducina, la acción estimuladora de la proteína *G* se desconecta por medio de un temporizador incorporado que convierte el GTP en GDP.

El parecido entre la transducina y la proteína *G* (se han identificado varios) abarca la estructura y la actividad de ambos. La transducina y la proteína *G* pertenecen a la misma familia general de proteínas de acoplamiento de señales. Todos los miembros de esa familia identificados hasta ahora presentan casi la misma subunidad beta. Además, sus subunidades alfa ejercen idéntica función, coincidencia que se acaba de demostrar en el nivel molecular. Recientemente, varios laboratorios han secuenciado los segmentos de ADN que codifican las subunidades alfa de la transducina y de tres proteínas *G*. La información del ADN indica que aproximadamente la mitad de las secuencias de aminoácidos de las cuatro proteínas son idénticas o casi.

Cuando se examina globalmente la información genética se advierte que en las proteínas aparecen regiones conservadas a través de la evolución, mientras otras han divergido no poco. Se distinguen en esas proteínas tres sitios de unión: uno para los guanil nucleótidos, otro para el receptor activado (la rodopsina o el complejo hormona-receptor) y un tercero para la proteína

efectora (la fosfodiesterasa o la adenilato ciclasa). Como cabe esperar de su crucial función en la activación de la cascada, el sitio de unión para el GTP o el GDP es el conservado con mayor fidelidad entre las proteínas.

Ciertamente, las regiones de unión del GTP a esas proteínas se parecen a una región de otra proteína, de función muy distinta, el factor de elongación *Tu*; le corresponde a éste un papel decisivo en la síntesis proteica de ciertas bacterias: aporta los ARN de transferencia (los "anzuelos" que transportan aminoácidos específicos y les permiten incorporarse a las cadenas de aminoácidos en crecimiento) a los ribosomas, los orgánulos donde se sintetizan las proteínas. En su funcionamiento, el *Tu* sigue un ciclo análogo al de la transducina en la activación visual. El ciclo está impulsado por la ruptura de una molécula de GTP y existe un sitio en el *Tu* donde se ancla GTP. La secuencia de aminoácidos de ese sitio recuerda bastante la de los sitios de unión para el guanil nucleótido de la transducina y de las diversas proteínas *G*.

La síntesis proteica es una de las actividades metabólicas fundamentales de cualquier célula. Por tanto, parece probable que el factor de elongación *Tu*, que interviene en esa función, posea un origen evolutivo anterior al de las proteínas *G* o su emparentada, la transducina. En efecto, el *Tu* podría ser el antepasado de la transducina y de las proteínas *G*. La toma y liberación controlada de proteínas acopladas al intercambio de GDP por GTP (y su posterior degradación) debió sin duda perfeccionarse en la evolución temprana; el factor de elongación *Tu* representaría, así, una versión primitiva del ciclo.

Uno de los numerosos aspectos de la evolución que causan admiración es que los mecanismos desarrollados para satisfacer una función pueden más tarde modificarse y aplicarse a misiones distintas. Ese, creo yo, debió ser el caso del mecanismo del *Tu*. Tras desarrollarse para mediar la síntesis proteica, se conservó durante miles de millones de años y, en última instancia, se aplicó a la transducción de estímulos hormonales y sensoriales. En los últimos años se ha caracterizado con gran detalle una de esas funciones: el ciclo de la transducina. El resultado ha sido extremadamente satisfactorio. Ahora, por primera vez, se ha interpretado en el nivel molecular uno de los fenómenos sensoriales más precisos de la naturaleza: la excitación visual.

Los anillos de Urano

¿Por qué son tan estrechos y oscuros? Lo que se descubrió en el encuentro del Voyager 2 *sugiere que el sistema de anillos podría ser una fase transitoria en una epopeya de creación y destrucción*

Jeffrey N. Cuzzi y Larry W. Esposito

En 1977, un inesperado resultado experimental condujo a la sorprendente, pero ineludible, conclusión de que el planeta Urano estaba rodeado de una familia de anillos, estrechos y oscuros, distintos de todo lo visto hasta entonces. La ulterior acumulación de información acerca de los mismos planteó varias preguntas fundamentales. ¿Por qué diferían los de Urano de los anillos, anchos y brillantes, de Saturno? ¿Por qué algunos no eran circulares? ¿Por qué tenían anchuras variables y bordes definidos y había vastas extensiones de espacio vacío entre ellos?

El encuentro del *Voyager 2* con Urano, en enero de 1986, se proyectó para someter a prueba ciertos modelos dinámicos de la estructura de los anillos mediante la determinación precisa de la posición de los conocidos, la búsqueda de otros nuevos y la observación del tamaño y la distribución exacta de las partículas en el interior de los distintos anillos. Y tal vez lo más importante, el vehículo espacial debía también rastrear la presencia de los pequeños satélites interanulares que describen órbitas entre los anillos y que, según se cree, guían a las partículas de los anillos, manteniéndolas en órbita, a través de las fuerzas gravitatorias sobre ellas.

Las cámaras del *Voyager 2* descubrieron un nuevo anillo, estrecho, y unas 100 bandas casi transparentes, invisibles desde la Tierra. Descubrieron también varios arcos parciales de anillos. Las partículas de los anillos conocidos son mayores de lo que se había supuesto; van desde el tamaño de una pelota de balonmano hasta el de un automóvil (entre unos 10 centímetros y algunos metros). Las partículas de las bandas de polvo recién descubiertas son, por contra, mucho menores (unos 0,02 milímetros), y sus posiciones no guardan una relación sencilla con las de los anillos identificados con anterioridad. Se halló que diez pequeños satélites describían órbitas dentro de la que sigue Miranda, el satélite más próximo a Urano de los cinco principales [véase "Los satélites de Urano", por Torrence V. Johnson, Robert Hamilton Brown y Laurence A. Soderblom; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio de 1987]. De los nuevos satélites, dos parecen guiar las partículas del anillo más externo; pero no se ha encontrado ningún satélite interanular del tamaño que se esperaba en la vecindad de los otros anillos. Los principales anillos y los nuevos satélites son negros como el carbón.

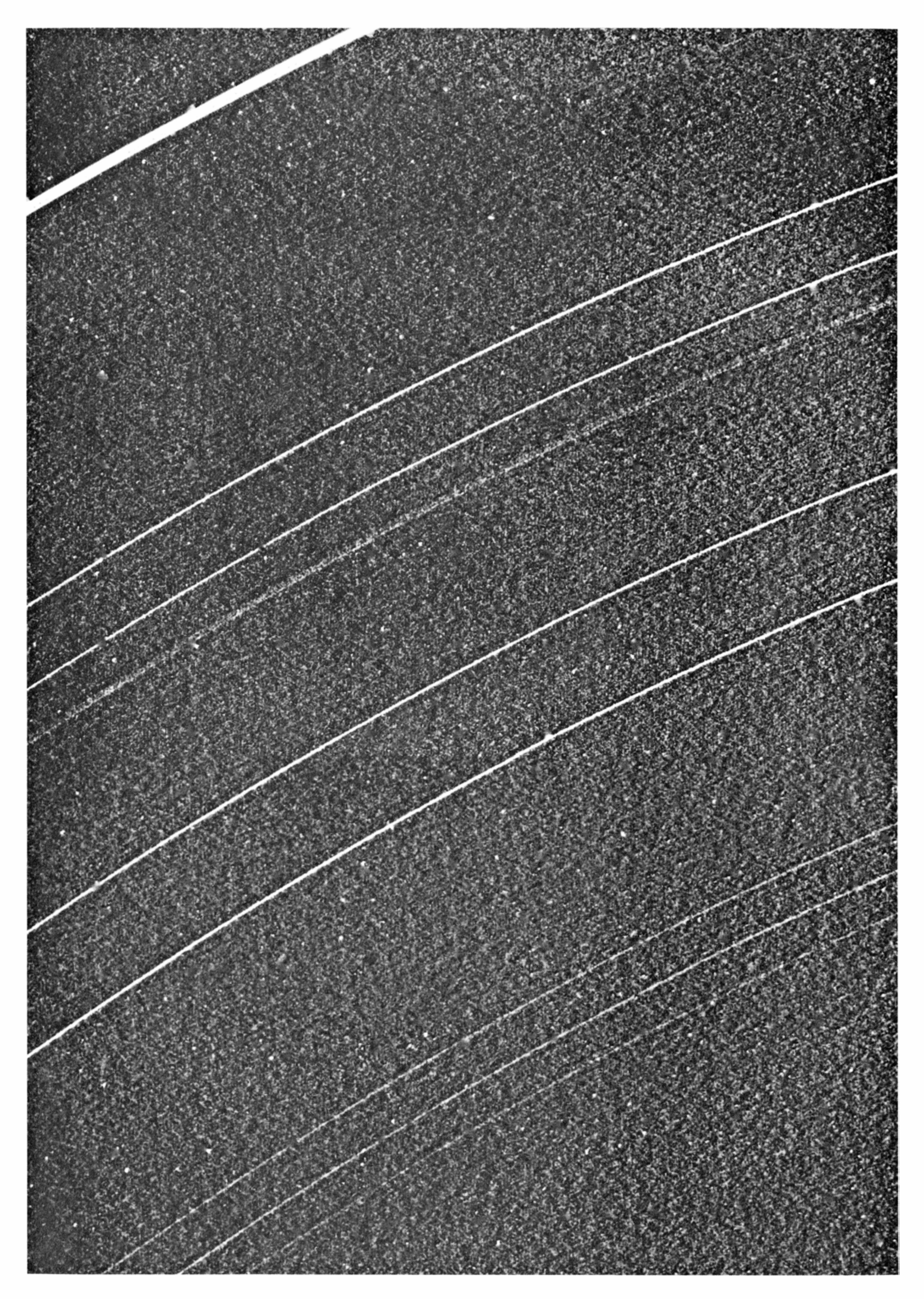
La información que el *Voyager 2* transmitió a través de casi cinco mil millones de kilómetros de distancia ha corroborado múltiples aspectos de los modelos dinámicos de los anillos de Urano. Pero los nuevos resultados han puesto de manifiesto, a su vez, algunos inconvenientes de los modelos. La información ha aportado nuevas perspectivas sobre esas estructuras de Urano, así como los estrechamente relacionados sistemas de anillos de Saturno, Júpiter y Neptuno.

El descubrimiento de los anillos de Urano se realizó durante una ocultación estelar, en la que se registró el brillo de una estrella mientras un planeta pasaba entre ella y la Tierra. La principal ventaja de la técnica, que se desarrolló para estudiar la atmósfera de los planetas, estriba en su alta resolución, a tenor del pequeño tamaño aparente de las estrellas. Durante las ocultaciones estelares se pueden distinguir desde la Tierra accidentes de entre uno y cinco kilómetros; en comparación, las mejores vistas telescópicas de los planetas exteriores tienen resoluciones relativamente bajas, de miles o decenas de miles de kilómetros.

El 10 de marzo de 1977, varios grupos de investigadores observaron la ocultación por Urano de la estrella SAO 158687. Para calibrar sus instrumentos, iniciaron las observaciones mucho antes de la ocultación y las continuaron durante todo el tiempo que les fue posible después. Para su sorpresa, la luz estelar se interceptaba bruscamente, a cortos intervalos, antes y después de que Urano pasara por delante de la estrella. Al principio, las breves ocultaciones se atribuyeron a un cinturón de asteroides en torno al planeta. La idea de los anillos se rechazó en un comienzo ante la brevedad de las ocultaciones: los anillos habrían tenido que ser mucho más estrechos que los de Saturno. Sin embargo, cuando en los días siguientes se compararon los datos de distintos observadores independientes, quedó claro que cada ocultación a un lado de Urano coincidía con otra ocultación en el otro lado. Para justificar esas observaciones había que admitir que el planeta estaba rodeado de una gavilla de anillos en forma de hebras.

En el curso de los años posteriores, las observaciones de Urano, realizadas durante más de 200 ocultaciones estelares por el planeta, revelaron nueve anillos estrechos, todos los cuales caen dentro de un radio planetario, a contar desde la cima de la atmósfera de Urano. Siguiendo las diferentes notaciones de los descubridores, los anillos se designan (en orden de distancias crecientes desde Urano) 6, 5, 4, alfa, beta, eta, gamma, delta y épsilon. La mayoría de las ocultaciones más recientes fueron observadas por James L. Elliot y Richard G. French, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, e, independientemente, por Philip D. Nicholson, de la Universidad de Cornell, junto con sus colaboradores. Su tra-

1. ANILLOS DE URANO, según una imagen obtenida por el *Voyager 2*, desde una distancia aproximada de un millón de kilómetros, cuando el vehículo se acercaba al planeta. Los anillos, semejantes a cuerdas y, en su mayor parte, densamente poblados de partículas, miden escasos kilómetros de anchura. Están separados por cientos de kilómetros de espacio virtualmente vacío. Un nuevo anillo, el 1986U1R, a duras penas se distingue entre el más externo (épsilon) y el siguiente brillante (delta). Los anillos reflejan sólo el 1 % de la luz incidente.



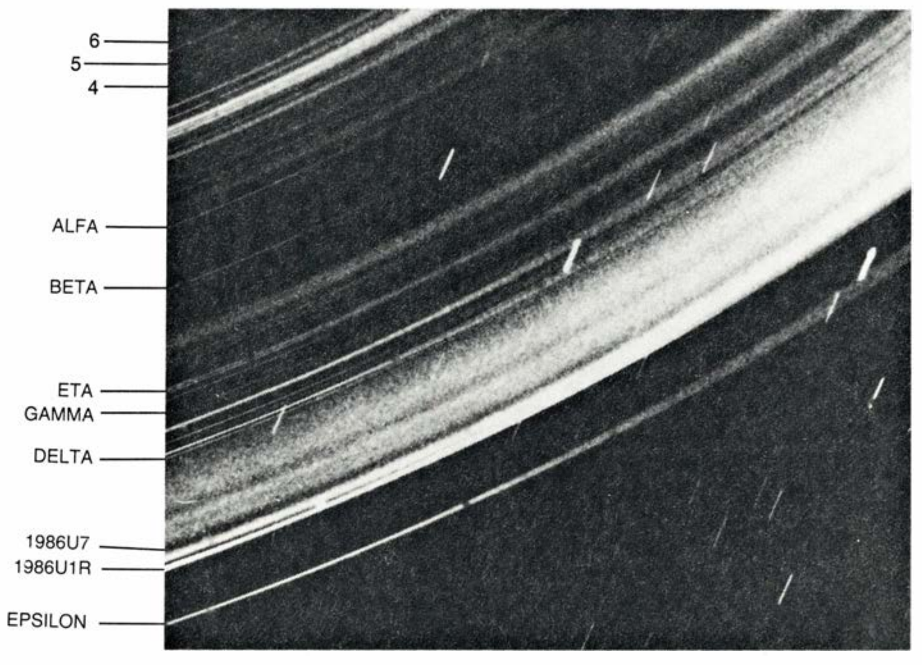
bajo puso de manifiesto, con un extraordinario grado de precisión, las propiedades de las órbitas de los anillos. Los datos detectan incluso las diminutas perturbaciones del propio Urano causadas por sus principales satélites.

No todos los anillos son circulares ni están en el plano ecuatorial de Urano. Sus anchuras varían desde menos de dos kilómetros hasta cerca de 100 kilómetros. En comparación, los anillos principales de Saturno ocupan una región del espacio de 60.000 kilómetros de anchura. Este parámetro, en el anillo épsilon de Urano, que es el exterior y el mayor, varía entre 26 y 96 kilómetros. Variación que no es aleatoria: la anchura aumenta en proporción con la distancia de la materia del anillo al planeta. En otras palabras, en su parte más próxima a Urano, el anillo épsilon muestra su máxima angostura y es casi opaco. En su parte más lejana, es cinco veces más ancho y cinco veces más transparente. Los anillos alfa y beta muestran un comportamiento similar, pues las órbitas dentro de cada anillo están apretadamente juntas. La posición de los ejes mayores de las órbitas de los anillos varía al azar de un anillo a su inmediato.

Los tres siguientes, de entre los más prominentes (eta, gamma y delta), tienen partes centrales muy estrechas, con sólo algunos kilómetros de anchura; eta y delta presentan también componentes más anchas y transparentes. Aunque estos anillos son circulares en promedio, cada uno de ellos muestra variaciones que diríanse aleatorias en su radio y anchura. Las variaciones son incluso mayores que la anchura media de los propios anillos.

Las fluctuaciones, aleatorias al parecer, del radio y la anchura de los anillos eta, gamma y delta ofrecen un comportamiento semejante al de algunos anillos estrechos del sistema saturniano. El anillo *F* de Saturno y dos arcos de anillo de un gran hueco llamado división de Encke son filamentos de escasos kilómetros de anchura y muestran rizos y ondulaciones altamente irregulares, así como una considerable fracción de polvo microscópico. Estas características se han atribuido a violentas colisiones entre partículas producidas por las fuerzas gravitatorias ejercidas por los satélites próximos.

Sabiendo las anchuras de los anillos de Urano y la pequeña cantidad de luz que reflejan, los investigadores habían concluido, antes incluso del encuentro del *Voyager 2*, que las partículas de los anillos debían ser muy oscuras; resulta que una superficie plana de la materia de las partículas refleja menos del 5 por ciento de la radiación solar incidente sobre ella. En cambio, los cinco satélites principales de Urano tienen una reflectividad de alrededor de un 30 por ciento; la Luna y Marte, una reflectividad aproximada de un 10 por ciento.



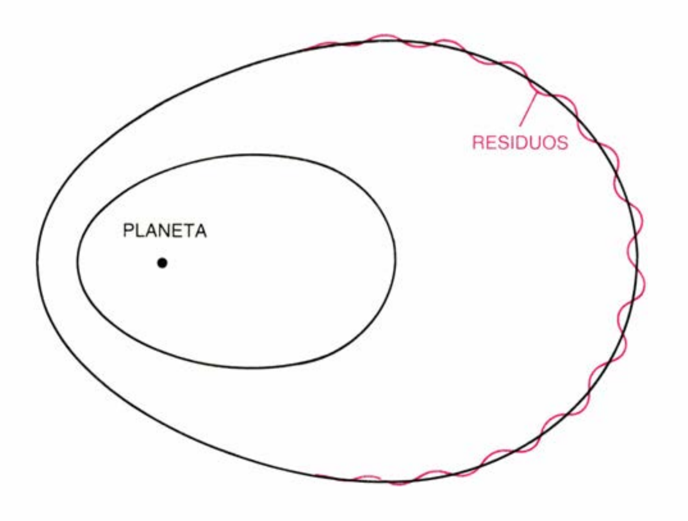
2. BANDAS DIFUSAS DE POLVO MICROSCOPICO, registradas en una imagen única de larga exposición obtenida después de que el vehículo espacial *Voyager 2* pasara junto a Urano. Se aprecia casi un centenar de bandas. La estructura más externa corresponde al anillo épsilon, que parece estar aislado del grueso del polvo. El 1986U1R es, en la imagen, la estructura más brillante, señal de que abunda en polvo.

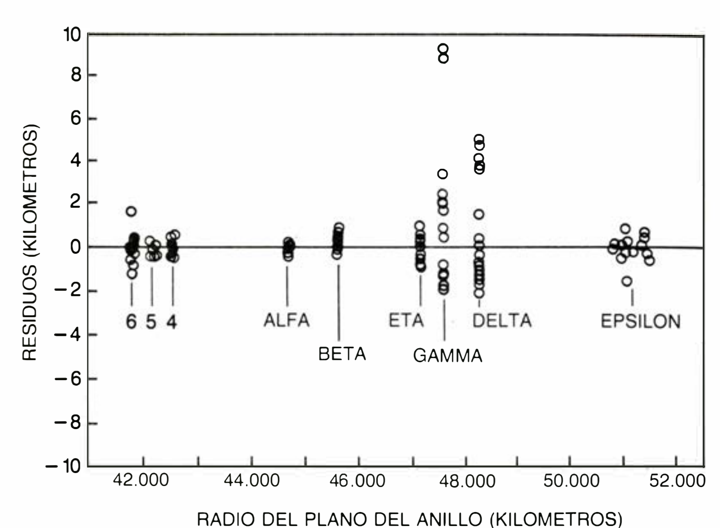
El encuentro del *Voyager 2* proporcionó la primera vista a corta distancia de los anillos de Urano, imagen que ahora permite comparar los anillos de Urano con los de otros planetas gigantes (Júpiter y Saturno) que el vehículo espacial visitó. A medida que el *Voyager 2* se iba acercando a Urano –un planeta casi liso, recubierto de gases y con 17 veces la masa de la Tierra– su atención se dividía entre la atmósfera de Urano, los anillos y los satélites. Aunque se sabía que los nueve anillos principales eran demasiado estrechos y oscuros para poderse estudiar con detalle mediante las cámaras del vehículo espacial, se detectaron, no obstante, notables diferencias entre ellos [*véase la figura 1*].

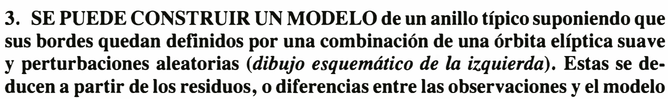
La calidad de las imágenes obtenidas durante la misión es notable, si consideramos las dificultades encontradas. Tomar una fotografía de los anillos constituye una hazaña comparable a la de fotografiar ladrillos de carbón sobre fondo negro, en la base de un árbol de Navidad iluminado por una sola bombilla en la copa, empleando una cámara con película de sensibilidad de 1 ASA. Tal imagen requeriría una exposición de unos 15 segundos. Habría sido imposible obtener imágenes nítidas de los anillos sin las importantes mejoras realizadas durante varios años por los ingenieros del vehículo espacial *Voyager 2* [véase "Preparando el encuentro del *Voyager 2* con Urano", por Richard P. Laeser, William I. McLaughlin y Donna M. Wolff; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero de 1987].

Se obtuvieron nuevas imágenes cuando el *Voyager 2* atravesó el plano de los anillos y los observó casi de canto. Después de que la nave dejara atrás el planeta, y mientras el Sol permanecía oculto por éste, se tomó una imagen única de gran exposición, a una pequeña distancia angular del Sol. La imagen revela unas 100 bandas, muy difusas y casi transparentes, de polvo miscroscópico que rodean a los anillos conocidos [*véase la figura 2*].

Igual que los observatorios asentados en tierra, el *Voyager 2* aprovechó las ocultaciones estelares. Siguió un método semejante al que condujo al descubrimiento de los anillos. En este caso, sin embargo, el poder de resolución era mucho mayor, dada la proximidad del vehículo a Urano. La cercanía del enfoque permitió superar una limitación fundamental de los estudios con ocultaciones: el "limpiado" de las sombras proyectadas por el objeto bajo






3. SE PUEDE CONSTRUIR UN MODELO de un anillo típico suponiendo que sus bordes quedan definidos por una combinación de una órbita elíptica suave y perturbaciones aleatorias (*dibujo esquemático de la izquierda*). Estas se deducen a partir de los residuos, o diferencias entre las observaciones y el modelo suavizado de anillo. Los residuos asociados a los nueve anillos principales del planeta Urano son bastante grandes, de varios kilómetros (*diagrama de la derecha*). Los residuos de los anillos eta, gamma y delta, muy grandes, se atribuyen a perturbaciones gravitatorias ejercidas por pequeños satélites próximos.

consideración. Las sombras producidas por objetos menores o por accidentes estructurales de los anillos se degradan fácilmente por difracción y pueden verse sólo a distancias muy cortas. Por último, al pasar el *Voyager 2* por detrás de los anillos, las radioseñales que emitía hacia la Tierra se ocultaron también, proporcionando otro medio independiente de realizar observaciones de alta resolución.

Las mejores imágenes del *Voyager 2* revelaron cierta cantidad de polvo microscópico, distribuido ampliamente por los anillos de Urano. Dicho polvo reviste especial interés, porque las partículas diminutas, en los anillos planetarios y alrededor de los mismos, se eliminan rápidamente en virtud de la erosión instada por los micrometeoritos y los electrones de los cinturones de radiación. La existencia de polvo implica que debe existir una fuente local de larga vida, constituida por partículas de masa mayor.

La verdad es que los anillos principales no se caracterizan por presentar especiales cantidades de polvo (bastante menos del 1 por ciento de la superficie). La estructura más polvorienta es, de hecho, uno de los nuevos anillos más prominentes: 1986U1R. La ausencia de polvo en los principales constituyó una sorpresa. La analogía con varios de los anillos estrechos de Saturno había alimentado la esperanza de los investigadores en el sentido de que, al menos, los anillos eta, gamma y delta de Urano albergarían una cantidad apreciable de polvo. El *Voyager 2* reveló, no obstante, que la enrarecida atmósfera superior de Urano era considerablemente más densa de lo que se había supuesto. Al parecer, la atmósfera arrastra a las partículas microscópicas de polvo fuera de sus órbitas en apenas unos centenares de años, de igual manera que las trazas superiores de la atmósfera terrestre produjeron la destrucción del *Skylab*, un vehículo orbital mucho mayor y bastante más cercano también.

Por comparación de la transparencia de los anillos a las dos longitudes de onda de radio transmitidas por el *Voyager 2* cuando pasó detrás de los anillos, se llegó a un conocimiento sólido de las partículas de los anillos. Los tamaños de las partículas mayores son del orden de varios metros, comparables al tamaño de las partículas de los anillos de Saturno. Sorprende que los anillos uranianos contengan, al parecer, muy pocas partículas de tamaños del milímetro y centímetro, en abierto contraste con la situación de Saturno. Conocidos los tamaños de las partículas y aceptado que su densidad viene a ser la misma que la de los meteoritos primitivos (1,5 gramos por centímetro cúbico), se concluye que los anillos presentan, en general, una densidad superficial de masa de varios cientos de gramos por centímetro cuadrado. Se trata de un valor mayor que el atribuido a la común densidad superficial de masa, incluso en el imponente anillo *B* de Saturno.

Pero ocurre que la densidad estimada contradice la densidad predicha por las teorías del comportamiento dinámico de los anillos. Al no ser Urano perfectamente esférico, las partículas de los anillos elípticos están sometidas a precesión, o giro de sus órbitas, de modo que el punto de máxima proximidad a Urano (periapsis) avanza despacio en la dirección orbital. Ahora bien, la velocidad de precesión varía con la distancia de la órbita al planeta; la configuración observada de las órbitas de las partículas, unas dentro de otras, deberá pues destruirse, por choques entre las propias partículas, en la duración de un siglo más o menos, lo que provocará que las órbitas se conviertan en circulares. De acuerdo con la teoría que gozaba de mayor aceptación antes del viaje del *Voyager 2*, las elipses se mantenían unas dentro de las otras porque la autogravitación de las partículas contrarrestaba la precesión diferencial. Según estas predicciones, sin embargo, la densidad superficial de masa de los anillos debería ser más de un orden de magnitud inferior a la observada.

Cabe otra posibilidad: que el leve rozamiento producido por las variaciones de la velocidad orbital de las partículas que van chocando sin brusquedad a medida que sus órbitas dejan de estar en fase aporte la fuerza necesaria para evitar la destrucción ulterior. La naturaleza de las fuerzas que mantienen las órbitas elípticas unas dentro de otras sigue siendo difícil de hallar.

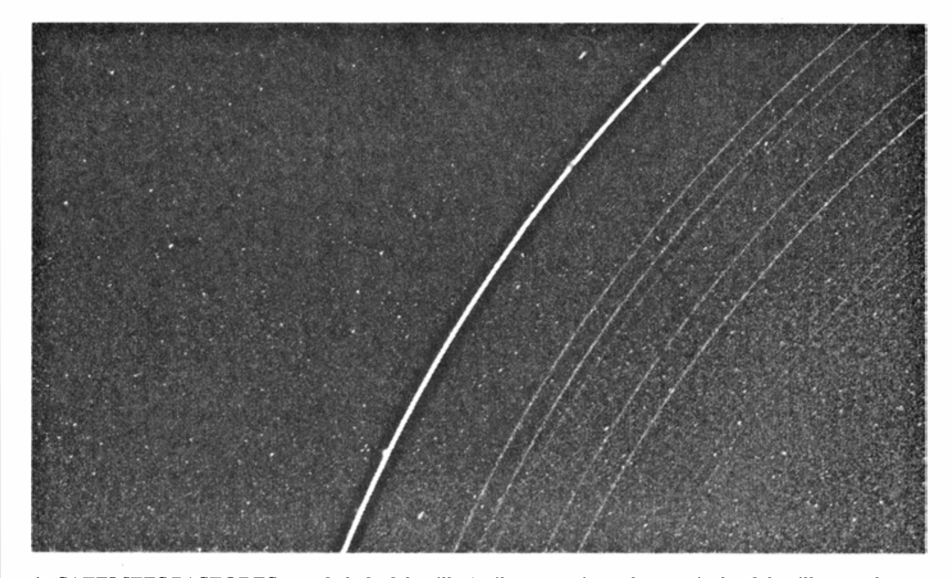
El aspecto oscuro y la falta de color de las partículas de los anillos recuerdan los de los diez satélites, pequeños e interiores, descubiertos por el *Voyager 2*. Una cara del gran satélite exterior de Saturno (Japeto) aparece asimismo oscura, pero tiene un matiz

rojizo. La mayoría de asteriodes, los satélites y los anillos de Júpiter son también rojizos.

¿A qué se debe esa obscuridad de los satélites interiores y los anillos? Según una hipótesis, sus superficies contenían inicialmente hielo rico en metano. Los electrones de alta energía de los cinturones de radiación vecinos a Urano incidieron sobre las superficies y expulsaron átomos de hidrógeno, dejando un residuo carbonoso oscuro (los cinco satélites principales de Urano, cuyas órbitas están, en su mayor parte, fuera de los cinturones de radiación uranianos, son considerablemente más brillantes que los anillos o los satélites interiores). Una dificultad de este supuesto estriba en el proceso de radiación, del que se han elaborado modelos en laboratorios terrestres, pues suele producir enrojecimiento, al mismo tiempo que oscurecimiento. Sin embargo, ninguno de los anillos o satélites de Urano llama la atención por su carácter rojizo.

Por otra parte, el aspecto oscuro y la falta de color del sistema de anillos y satélites interiores podrían atestiguar la presencia de materia inalterada, con las propiedades de los meteoritos primitivos, llamados condritas carbonáceas, que contienen grandes cantidades de carbono, minerales opacos y materia orgánica oscura. Otra posibilidad, menos fundada, sería que la materia fuera un conglomerado formado por materia atmosférica que haya sufrido complicados procesos durante un impacto sobre Urano de un cuerpo de las proporciones de la Tierra. Tal impacto daría cuenta también del hecho de que el eje de rotación de Urano descansa virtualmente en el plano orbital del planeta [véase "Urano", por Andrew P. Ingersoll; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 1987]. Esperamos con interés la comparación de las propiedades de los anillos de Urano con el brillo y color de los arcos de anillos y posibles satélites interiores de Neptuno, el planeta hermano de Urano, cuando el *Voyager 2* pase junto a él, en agosto de 1989.

Sea cual sea la razón de la obscuridad de las partículas, la estructura de los anillos debe hallarse fuertemente influida por los satélites de Urano. Peter Goldreich y Scott D. Tremaine, del Instituto de Tecnología de California, han propuesto que la insólita angostura y elipticidad de los anillos es consecuencia de los satélites, que confinan las partículas de aquellos cual pastores a sus rebaños. De acuerdo con su hipótesis, las órbitas inicialmente circulares se habrían deformado en elipses por tirones gravitatorios de satélites interanulares que adelantaran o hayan sido adelantados por la materia del anillo. Al modificar la excentricidad, los pastores alteran el momento cinético de las partículas del anillo sin cambiar su energía orbital. Una órbita excéntrica tiene más energía que otra circular dotada del mismo momento cinético. Cuando se elimina el exceso de energía (por ejemplo, en choques ulteriores entre partículas), resulta, de nuevo, una



4. SATELITES PASTORES, a cada lado del anillo épsilon; mantienen las partículas del anillo en su lugar, al ejercer fuerzas gravitatorias sobre ellos. Los satélites, que aparecen como segmentos brillantes, reciben la denominación de 1986U8 (*fuera del anillo épsilon, en la parte superior*) y 1986U7 (*dentro del anillo épsilon, abajo*). La banda oscura que ciñe al anillo épsilon constituye un efecto artificial del procesado de datos. El vehículo espacial *Voyager 2* no detectó satélites de pastoreo cerca de ninguno de los otros ocho anillos.

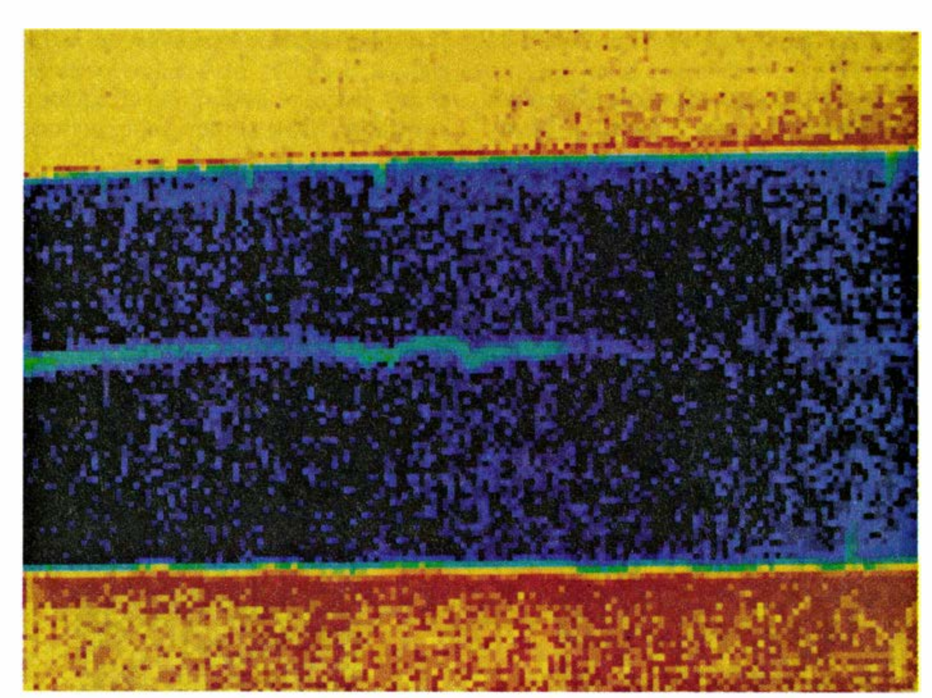
órbita circular. Esta nueva órbita tiene un momento cinético diferente que la sitúa más lejos del satélite.

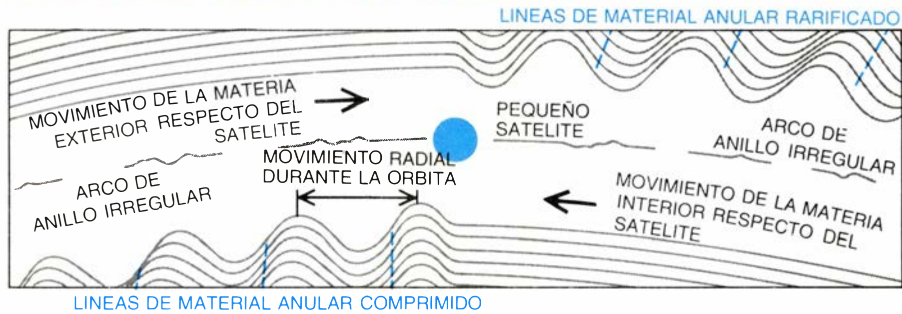
En virtud de ello, parte de la materia del anillo se aleja del satélite interanular, o parece ser repelida por él, a lo largo de muchos ciclos. El equilibrio entre la velocidad a la cual disminuye la energía y la velocidad a la cual se transfiere el momento cinético por todo el anillo podría ser el causante de la excentricidad global de esos estrechos anillos de pastoreo.

Se sabe, por ejemplo, que al menos un hueco de los anillos de Saturno, la división de Encke, lo ha barrido un satélite interanular hasta ahora no detectado, al que se le atribuye un radio de unos 10 kilómetros. El satélite interanular limpia el hueco por el mismo proceso de redistribución del momento cinético que produce el confinamiento de los anillos arriba descrito. Las pequeñas excentricidades orbitales que permiten el intercambio de cantidad de movimiento producen ondas cuya formación y amortiguamiento se ve a lo largo de los bordes del hueco.

De las numerosas imágenes de alta resolución obtenidas por el *Voyager 2*, se deduce que la mayoría de los diez nuevos satélites quedan fuera mismo de los anillos principales. Los dos satélites más internos, 1986U7 y 1986U8 (que han recibido, respectivamente, los nombres de Cordelia y Ofelia), quedan a horcajadas sobre el anillo épsilon, el más externo. Sus diámetros, entre 40 y 50 kilómetros, son comparables a los de los asteroides típicos y sus periodos orbitales se han determinado con buena precisión a partir de las secuencias de imágenes del *Voyager 2*.

Basándose en tales datos, Carolyn C. Porco, de la Universidad de Arizona, y Goldreich han mostrado que 1986U7 y 1986U8 ejercen fuerzas gravitatorias "resonantes" que mantienen las partículas del anillo épsilon confinadas en sus órbitas. En una relación de resonancia, los tirones gravitatorios de los satélites sobre las partículas están sincronizados de modo que se suman constructivamente; la excentricidad orbital aumentará, igual que el balanceo de un columpio dilata su amplitud si los empujones se dan con la frecuencia debida. Existe así una relación de resonancia entre el borde exterior del anillo *A* de Saturno y el gran satélite Jano; las partículas del anillo completan siete órbitas por cada seis descritas por el satélite. También hallamos una relación de resonancia entre el borde exterior de anillo *B* de Saturno y el satélite Mimas; el periodo orbital del satélite dobla el de las partículas.





5. PRUEBAS INDIRECTAS indican que hay satélites pastores en órbita en la división de Encke, un intervalo de 325 kilómetros (*arriba*) de los anillos de Saturno. En primer lugar, el borde interno, verdoso (*abajo*), tiene una apariencia ondulada comparado con el borde externo (*arriba*). En segundo lugar, se ven configuraciones irregulares de intensidad en la materia dentro del anillo, en la parte inferior; las configuraciones débense a las compresiones y rarefacciones de la materia del anillo causadas por el borde ondulado. En tercer lugar, hay un estrecho arco de anillo, con irregularidades, en el centro del intervalo. La ilustración inferior muestra cómo aparecen las compresiones y dilataciones, según se aprecian desde el satélite pastor.

En el caso de Urano, las partículas del borde interior del anillo épsilon completan 24 órbitas por cada 25 realizadas por 1986U7; las partículas del borde exterior culminan 14 órbitas por cada 13 descritas por el satélite interanular 1986U8. En otras palabras, la materia del anillo épsilon aparece confinada del mismo modo que los bordes exteriores de los anillos *A* y *B* de Saturno se mantienen por la acción de Jano y Mimas. El proceso es capaz de guiar la materia de los anillos, pero sólo en puntos discretos de resonancia.

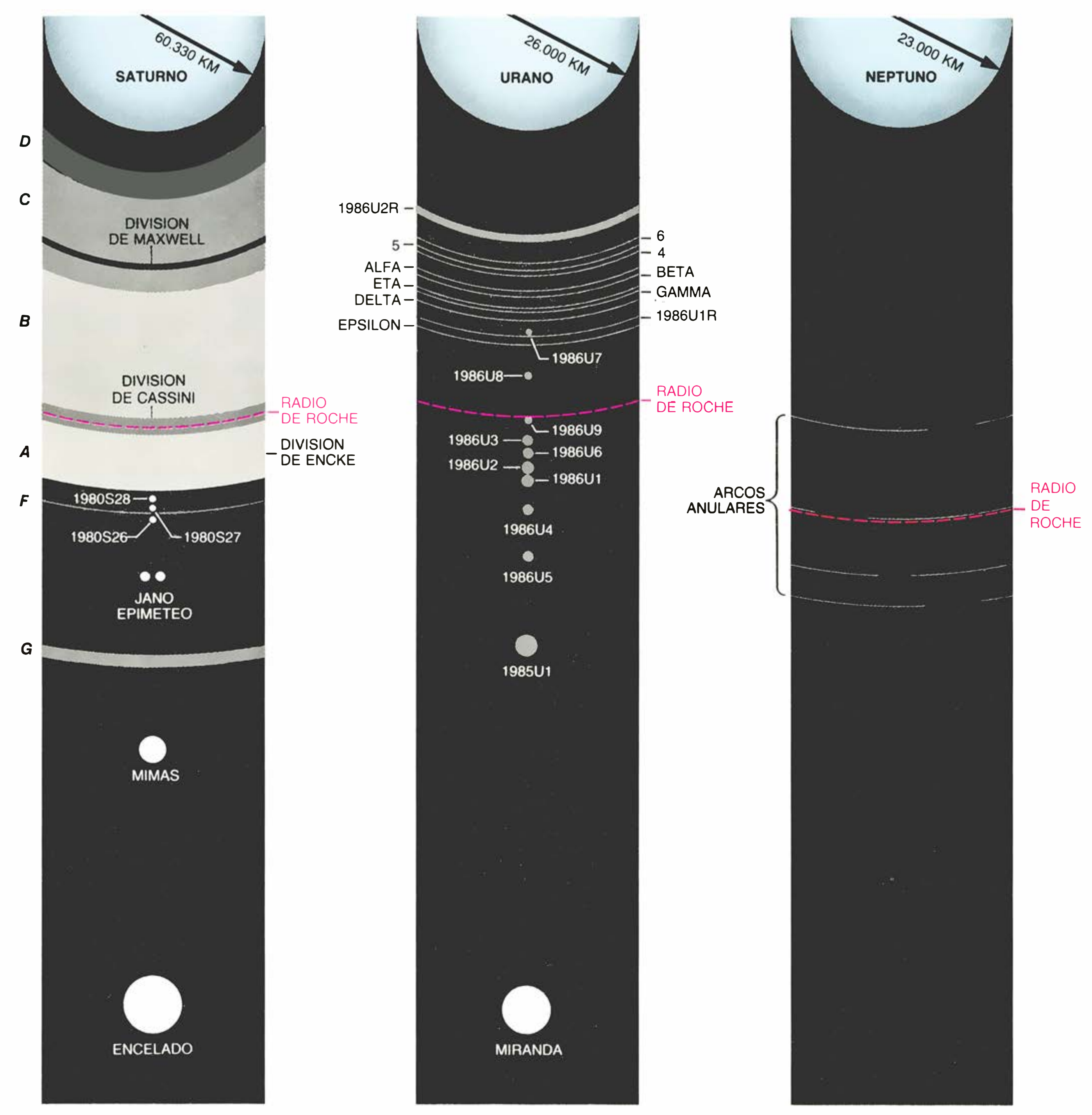
¿Hay alguna clase de proceso de guía que confine también cada uno de los ocho restantes anillos principales de Urano? Existen otras resonancias débiles, no muchas e insuficientes para explicar las órbitas observadas. Además, las cámaras del *Voyager 2* no detectaron ningún pequeño satélite interanular más. Eso no significa por supuesto que no lo haya. Las limitaciones de las observaciones no permiten descartar la existencia de múltiples pequeños satélites sin registrar, distribuidos entre los anillos, que podrían, en principio, proporcionar el confinamiento necesario para impedir que los anillos internos se dispersen y mantener la necesaria excentricidad orbital.

Otro problema del confinamiento se refiere a los arcos de anillos incompletos en torno a Urano, descubiertos por el *Voyager 2*. Alrededor de Neptuno, se observaron anillos parciales semejantes y se avistaron dos más en la división de Encke, durante los encuentros con Saturno del *Voyager 1* y *Voyager 2*, en 1980 y 1981 respectivamente. Aunque se han propuesto hipótesis de confinamiento dinámico de

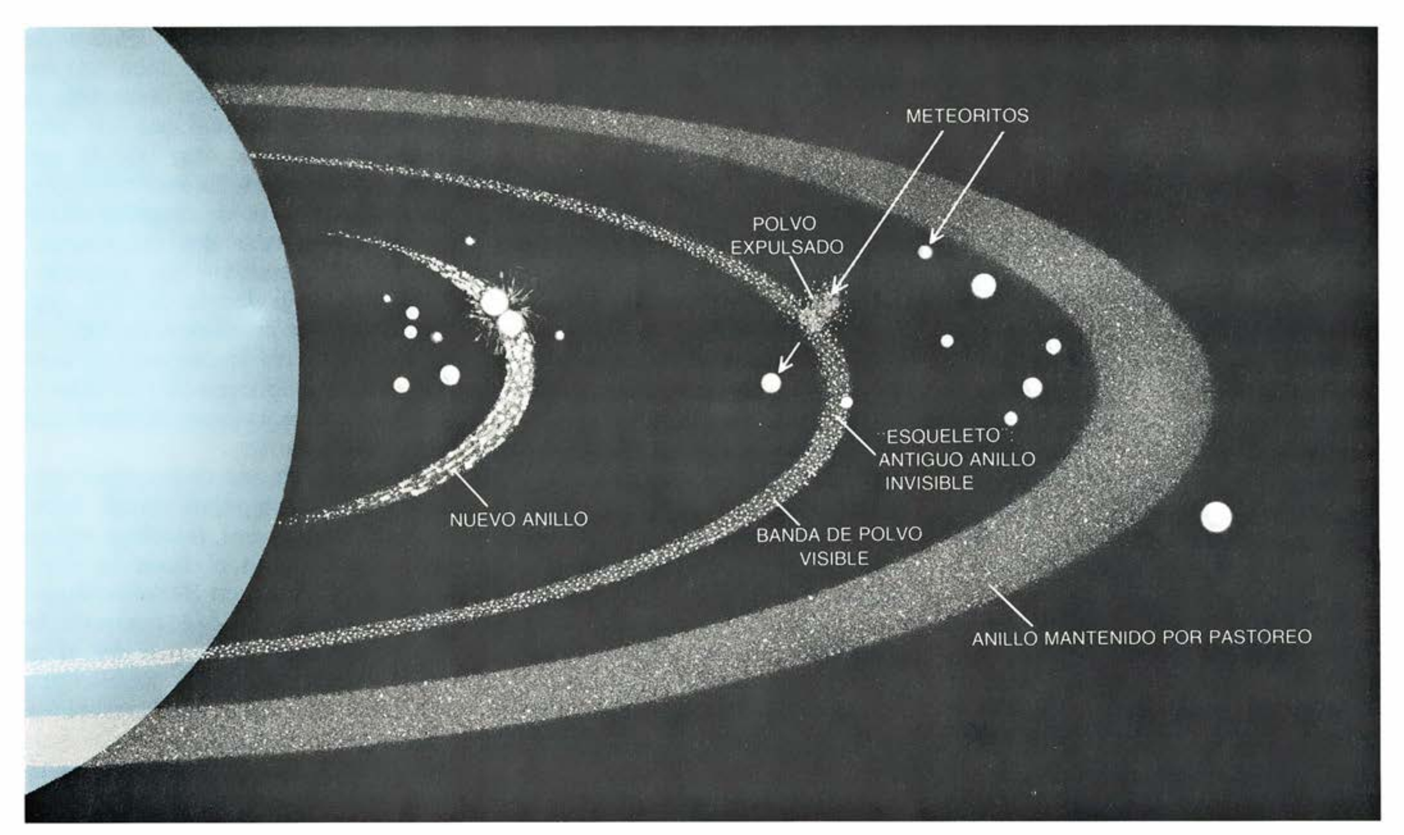
los arcos, las condiciones que deben satisfacerse no se cumplen ni en Saturno ni en Urano. La existencia de anillos parciales que ciñan Saturno y Urano continúa siendo un misterio.

Basta una rápida ojeada a los datos para advertir varios indicios importantes. Una banda de diez satélites de tamaño decreciente se encuentra entre los cinco satélites principales de Urano, confundiéndose con el sistema de anillos en el borde exterior de éstos. Cualquier modelo plausible de la dinámica de anillos predice que los estrechos y densos se difundirían en anchura y se harían transparentes en un periodo de tiempo mucho más corto que la edad del Sistema Solar. En consecuencia, los anillos estarán confinados por pequeños satélites pastores o serán de creación reciente. Los anillos incompletos, tales como los que se ven en la división de Encke y alrededor de Neptuno, poseerán una vida todavía más corta si no media confinamiento.

Varias observaciones sugieren que el sistema uraniano de anillos, así como otros sistemas anulares, muestran muchas señales más de juventud. Todas las micropartículas de polvo, que se hallan distribuidas por el sistema de anillos de una manera tan destacada cuan escasamente densa, serían barridas fuera de la órbita y perecerían convertidas en estrellas fugaces en la atmósfera de Urano transcurridos unos centenares de años. Incluso los nuevos satélites descubiertos quizá nacieron hace



6. SISTEMAS DE ANILLOS Y SATELITES de Saturno (*izquierda*), Urano (*centro*) y Neptuno (*derecha*). Muestran una sorprendente semejanza: una transición de algunos satélites mayores, en las regiones externas, hacia muchos satélites pequeños inmediatamente fuera de las regiones internas, ocupadas por los anillos. La posición de la transición coincide, aproximadamente, con la zona de Roche, allí donde las fuerzas planetarias de marea adquieren intensidad suficiente para fragmentar pequeños objetos. Datos recientes sugieren que muchos objetos todavía menores se hallan entremezclados con los anillos y los satélites.



7. FORMACION DE ANILLOS y arcos parciales, ocurrida a buen seguro a medida que fueran chocando entre sí pequeños satélites o se vieran erosionados, o destruidos, por la acción de meteoritos incidentes. De los choques saldrían pedazos de materia; pequeñas diferencias en la velocidad de éstos los habría alargado, rápidamente, en forma de arcos. Transcurrido cierto tiempo, cada arco pudo haberse transformado en un anillo completo y casi transparente (*izquierda*). Tales bandas estables podrían, entonces, proporcionar una fuente de materia para su erosión por meteoritos microscópicos, generando sin cesar polvo de vida corta (*centro*). Por supuesto, algunos anillos pudieron persistir gracias a satélites pastores (*derecha*). (Esquema realizado por George Retseck.)

sólo unos mil millones de años (alrededor de una quinta parte de la edad del Sistema Solar). Como ha señalado Eugene M. Shoemaker, de la Inspección Geológica de los Estados Unidos, basta el ritmo actual de bombardeo por meteoritos cometarios para destruir cualquier satélite de más de mil millones de años. Fijémonos, por ejemplo, en Miranda, el satélite más interno de Urano. Tiene una estructura superficial insólita, que podría indicar una reunión geológicamente reciente de fragmentos para formar el satélite. Los satélites menores, que habrían de ser más numerosos para asegurar el pastoreo necesario para mantener los anillos principales, se encuentran más expuestos aún a tales destrucciones catastróficas.

Podría ocurrir que algunos, si no todos los estrechos anillos de Urano, se creasen, simultánea o separadamente, durante la destrucción catastrófica de satélites por meteoritos cometarios. La mayoría de los anillos, admitiendo incluso las más altas densidades superficiales, apenas contienen la masa de un objeto de uno a dos kilómetros de radio. Los primitivos precursores de los anillos podrían haber desaparecido hace mucho tiempo, barridos por los restantes satélites interanulares o arrastrados hacia el propio planeta. De manera análoga, los arcos parciales detectados por el *Voyager 2* podrían ser acumulaciones transitorias de restos producidos durante impactos entre miembros menores, y hasta ahora no descubiertos, de una banda de satélites pequeños similar a un cinturón de asteroides. A medida que tales arcos parciales se extendieran, se convertirían en bandas de residuos simétricas y casi transparentes. Aun cuando los esqueletos de grandes partículas de tales bandas fueran invisibles, su continua erosión por los micrometeoritos proporcionaría una fuente para las bandas de polvo microscópico que sí se han observado. Procesos análogos podrían estar desarrollándose en los sistemas de anillos y satélites de Júpiter, Saturno y Neptuno.

La población subyacente de objetos que podrían, en último término, ser responsables de tales interacciones constaría, tal vez, de miles, o incluso millones, de pequeños satélites cuyos tamaños variasen de cientos de metros a kilómetros. Los pequeños satélites podrían constituir la prolongación de la tendencia hacia satélites menores y más numerosos observada en los tres planetas gigantes que el *Voyager 2* ha explorado. Una población de pequeños satélites proporcionaría el eslabón que falta entre los anillos y los grandes satélites. Quizá no fuera accidental que tal población se alojase cerca de la zona de Roche: una región donde las fuerzas de marea gravitatoria de un planeta impiden el crecimiento de grandes satélites.

A modo de resumen general, estamos empezando a sospechar que el austero sistema de anillos de Urano pudo haber atravesado una historia violenta y caótica. El sistema actual de Urano –que consta de 10 estrechos anillos, numerosas cintas de polvo, algunos arcos angostos de anillos y una bandada de pequeños satélites– sería, tal vez, un fragmento de su constitución primitiva, una fase pasajera más en el continuo proceso de creación y pérdida, del que surgirán los futuros anillos de Urano. La historia de los sistemas anulares de Júpiter, Saturno y Neptuno pudo haber recorrido el mismo camino. Lo cierto es que determinados aspectos de los sistemas de anillos y satélites podrían ser transitorios y en evolución continua, como han resultado ser los continentes terrestres, en permanente deriva.

Ciencia y sociedad

Supermicroscopio

Se ha desarrollado un sistema de observación microscópica que, tomando rayos X "duros", es decir, muy energéticos, de un haz de sincrotrón, produce imágenes tridimensionales con una resolución próxima al micrometro, mil veces superior a la de la tomografía computarizada (TAC) de uso clínico. El nuevo ingenio lo han desarrollado, en la Exxon Research and Engineering Company, Brian P. Flannery, Harry W. Deckman, Wayne G. Roberge y Kevin A. D'Amico.

El sistema emplea un haz de la fuente luminosa del sincrotrón del Laboratorio Nacional estadounidense de Brookhaven, junto con un detector de rayos X de alta resolución y procedimientos informáticos avanzados de reconstrucción de imágenes, que amplían las técnicas tomográficas hasta el dominio microscópico. A ello responde el nombre que han dado los autores a su método: microtomografía tridimensional de rayos X. El sistema saca partido de una propiedad de las fuentes de sincrotrón, a saber, su capacidad de suministrar rayos X virtualmente monocromáticos, de energías ajustadas con gran exactitud para que correspondan a los niveles de absorción atómica inmediatamente superiores o inferiores a los de ciertos rasgos característicos; ello permite a los científicos obtener imágenes que recogen la distribución, en las muestras, de los elementos que se elija. En opinión de sus inventores, la microtomografía constituirá una sonda sin par en el estudio de la microestructura de una amplia variedad de materiales y tejidos biológicos.



1. MICROTOMOGRAFIA de rayos X de un diminuto insecto. Los colores, arbitrarios, se eligieron para destacar la estructura interna del organismo

En medicina, la tomografía explora, mediante rayos X, una sección plana del paciente. Las mediciones se someten a análisis matemático y se obtiene un mapa de secciones entrecruzadas: la imagen reconstruida de la estructura ósea o hística. La tomografía supera la ambigüedad de las imágenes radiológicas convencionales, en las que los objetos situados a lo largo de la misma línea de visión proyectan una sombra común.

La microtomografía se sirve de idénticos principios físicos y matemáticos. Sin embargo, la obtención de buenas imágenes con resoluciones microscópicas exige un incremento ingente de la intensidad del haz de rayos X. La reducción del tamaño de los pixeles (las unidades que configuran la imagen) en un factor de 10^3, necesaria para pasar de la resolución de un milímetro de la tomografía convencional a la de un micrometro propia de la microtomografía de rayos X, exige aumentar la luminosidad de los rayos X en un factor de 10^{12}. Lee Grodzins, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, señaló hace algunos años que los sincrotrones de rayos X podrían ofrecer el flujo adecuado para la creación de imágenes de alta resolución. El aprovechamiento de esas posibilidades requeriría, sin embargo, desarrollar nuevas técnicas de obtención de imágenes con rayos X y el avance suficiente de los métodos de tratamiento de datos que permitiera abordar el ingente volumen de información que demanda la reconstrucción de imágenes tridimensionales. Esos son, precisamente, los logros del grupo de Exxon.

Del, Rey, Johnny y Jimmy: naturaleza y educación

Cree la mayoría de los padres que sus hijos se sientan, agarran objetos, caminan y desarrollan otras destrezas a edades más tempranas cuando se les anima activamente en ese sentido que si se les abandona a su libre albedrío. No comparten ese criterio muchos psicólogos infantiles, para quienes el desarrollo de los niños se debe a la respuesta a una secuencia inalterable de órdenes genéticas, más que a la intervención parental u otro tipo de estímulos ambientales. En las revistas y en los libros de texto, los abogados de esta teoría suelen citar dos experimentos "clásicos", realizados con gemelos a principios de la década de 1930, para demostrar que privando a los niños de la interacción con sus mayores no se retrasa de modo permanente su desarrollo físico, ni lo acelerará el mucho empeño que se ponga.

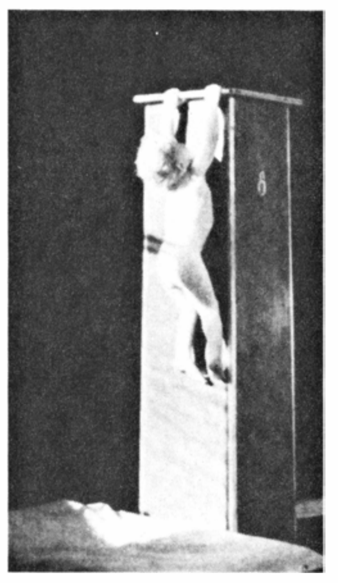
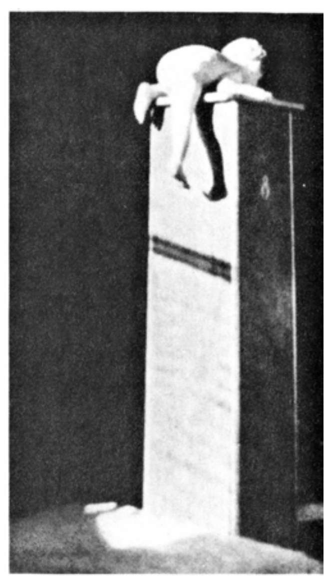
Tal interpretación de los experimentos ha sido ahora puesta en tela de juicio por Micha Razel, psicólogo infantil que colabora con el Instituto Weizmann de Ciencias en Rehovot, Israel. Razel afirma que, todo lo contrario, los experimentos evidenciaban que el estímulo ambiental resulta decisivo para un buen desarrollo: las restricciones impuestas al estímulo por los experimentadores, dice, provocaron una inferioridad de condiciones físicas en dos sujetos, quizá para siempre.

Las pruebas, iniciadas ambas en 1932, las llevaron a cabo independientemente dos jóvenes psicólogos que habrían de convertirse en profesionales destacados: Wayne Dennis, profesor ayudante entonces de la Universidad de Virginia, y Myrtle B. McGraw, que investigaba en el Hospital Presbiteriano de Columbia, en Nueva York. Auxiliado por su mujer, Marsena, Dennis estudió las gemelas fraternas Del y Rey, hijas de una indigente de Baltimore. Durante 13 meses, desde que las pequeñas contaron 36 días, se las mantuvo en una habitación de la casa de Dennis.

En el *Journal of Genetic Psychology* de 1935 Dennis escribía sobre el "semiaislamiento" de Del y Rey: "No se les ofreció juguetes hasta que cumplieron once meses. Para limitar las prácticas que pudieran influir sobre la capacidad de sentarse, se les retuvo casi siempre en las cunas, boca arriba . . . Durante los seis primeros meses, en presencia de las niñas mantuvimos el rostro inexpresivo, sin amago de sonrisa o enfado, y nunca jugamos con ellas, ni las acariciamos, les hicimos cosquillas, etcétera." Mientras duró el experimento, y para que las gemelas no pudieran verse, se colocó una mampara entre las cunas.

En 1938, en la misma revista, Dennis declaraba que su ensayo había demostrado que "durante el primer año, el niño 'crece' por cuenta propia". En apoyo de esa conclusión señalaba que tanto Del como Rey habían desarro-



*2. EL INTREPIDO JOHNNY se descolgaba, a los 21 meses de edad, de una peana de más de metro y medio de altura; Jimmy, su gemelo, que no había recibido adiestramiento, se resistía a bajar de otra de menor altura (***derecha***). Las fotografías aparecieron en* **Growth: A Study of Johnny and Jimmy**

llado muchas "respuestas" –risas, llevarse la comida a la boca y llorar en respuesta a los sonidos– aproximadamente a la misma edad que 40 niños "control" criados en sus hogares.

Sin embargo, un gráfico del mismo trabajo revelaba que Del y Rey tardaron más que el más rezagado de los infantes del grupo de control en gatear, sentarse o mantenerse de pie, por ejemplo. Dennis afirmaba que, mediante un período de adiestramiento desarrollado al cumplir los 15 meses, las gemelas habían alcanzado los niveles normales "bastante deprisa"; pero sus datos revelaban que Del no pudo mantenerse de pie ni caminar sin ayuda hasta que contó más de dos años. Al cumplir los cuatro, el coeficiente de inteligencia de Rey era de 107, pero el de Del sólo alcanzaba a 70; es más, un examen físico de Del a los seis años de edad evidenció que padecía parálisis parcial del lado izquierdo. Dennis restó importancia al "retraso general" de Del juzgando que "con toda probabilidad no se debía al experimento, sino a alguna deficiencia orgánica."

Según parece, Dennis, que falleció en 1976, nunca informó sobre el desarrollo posterior de las gemelas. En 1951 señaló que, concluido el experimento, Del y Rey no volvieron con su madre, quien "ha mostrado escaso interés en responsabilizarse de ellas", sino que vivieron "unas veces al cuidado de familiares y otras en el orfelinato".

Los gemelos de McGraw, Johnny y Jimmy, procedían de una familia pobre de Brooklyn. (McGraw los eligió creyendo que eran idénticos pero, cuando crecieron, comprobó que eran fraternos.) Sólo Jimmy, considerado el "control", sufrió restricciones, mientras que Johnny se sometió a un exhaustivo adiestramiento. Al describir la situación de Jimmy, exponía McGraw: "No se le permitía tener más de dos juguetes a un tiempo y se le mantenía en la cuna, sin que nadie le molestara. Lo que no significa que se le dejara aislado, puesto que se puso la cuna en una guardería, detrás de una mampara." El experimento se desarrolló en el laboratorio de McGraw. No se procedió a un seguimiento exhaustivo. A lo largo de los dos años que duró, los niños pasaban allí ocho horas al día y cinco días a la semana; el resto del tiempo, los gemelos vivían en casa, con su familia.

En 1933, McGraw informaba en el *Psychological Bulletin* que Johnny no había adquirido ninguna superioridad significativa para asir objetos, sentarse solo o caminar, por ejemplo; y concluía que "ciertos rasgos están sometidos a escasa o nula modificación por la práctica". Para afirmar a continuación que "otros tipos de conducta pueden adquirir especial desarrollo con el adiestramiento". En efecto, según escribió McGraw, cuando Johnny no había cumplido aún el año, trepaba por un plano inclinado 61 grados, buceaba y patinaba, mientras que "la extremada precaución de Jimmy bloqueaba a veces su rendimiento motor".

Al cabo de dos años se sometió a Jimmy a un adiestramiento intensivo para comprobar si lograba alcanzar a Johnny; ahora bien (salvo en el andar en triciclo), el rendimiento de Jimmy "nunca llegó a ser tan bueno como el de Johnny". A los 10 años de edad persistía la superioridad física de Johnny: "No es que corriera más deprisa o trepara más alto, escribió McGraw en un artículo publicado en 1942 en el *New York Times Magazine*, sino que mostraba más facilidad y más garbo".

McGraw, que tiene hoy 88 años y vive en Hastings-on-Hudson, Nueva York, mantiene que siempre estuvo convencida de la superioridad que la instrucción había conferido a Johnny, el cual, según recuerda McGraw, seguía siendo más ágil que Jimmy cuando los sometió a prueba por última vez, a los 22 años de edad. Al preguntársele por qué otros investigadores han afirmado que la superioridad lograda por Johnny fue efímera, respondió: "Supongo que la gente entiende lo que quiere entender".

En 1985 se publicó la revisión de los experimentos de Dennis y McGraw que ha efectuado Razel –donde se destaca el retraso de Del y la superioridad física a largo plazo lograda por Johnny sobre Jimmy–, que constituye un capítulo de *Advances in Applied Developmental Psychology*, dirigida por Irving E. Sigel, del Educational Testing Service, de los Estados Unidos. Razel está a la espera de publicar un artículo donde pide la realización de un estudio de seguimiento de Del, Rey, Johnny y Jimmy, para determinar los resultados a largo plazo conseguidos por aquellos experimentos. Sigel afirma estar considerando su publicación en el *Journal of Applied Developmental Psychology*, del que es director. "El adiestramiento infantil constituye un tema candente, dice, y Razel ofrece un punto de vista que tiende a minimizarse."

El perfume

Desde hace un siglo se extrae de un liquen la materia prima que constituye el principio básico de los perfumes, pero aún no se han sintetizado las moléculas responsables de su fragancia

Martine Seu-Salerno y John Blakeway

¿Por qué huelen tan bien las flores? No se sabe: ignoramos la ventaja adaptativa que confiere al hombre el disfrute de su olor. Mejor se conoce *cómo* huelen. El perfumista que intenta remedar la naturaleza, o el que pretende crear nuevas fragancias, tiene que componer, es decir, mezclar, productos básicos según métodos elaborados desde la antigüedad, cuya sistematización no llegó hasta mediados del siglo XX. Podrían ingeniarse perfumes constituidos por unos cuantos tipos de moléculas pero, por razones económicas y técnicas, se prefiere la utilización de extractos naturales, entre los cuales figuran numerosas moléculas olorosas que, aunque definidas ya, falta caracterizarlas, aislarlas y sintetizarlas.

El elevado coste de la materia olorosa natural —más de dos millones de pesetas el kilogramo de almizcle o cerca de las 600.000 pesetas el de extracto de barba de roble— ha animado a los fabricantes a mejorar los conocimientos sobre las diversas etapas de la extracción de las materias olorosas; simultáneamente, se ensaya en el laboratorio la síntesis de los principios constituyentes de los extractos naturales. En ese sentido, de la barba de tronco de roble se aprovecha un producto fundamental en el sector, utilizado sobre todo en la creación de perfumes *chyprés*, es decir, de olores complejos, ricos y sutiles, con un ligero olor de fondo a maleza. La producción de ese extracto se ha beneficiado de los numerosos avances de la química orgánica, pero constituye también un ejemplo arquetípico de los problemas con los que tropieza el fabricante de perfumes (que distinguimos del perfumista, la "nariz", que crea los perfumes). Problema principal es el de la calidad del producto entregado a los perfumistas, pues éstos desean reproducir fielmente las mezclas que elaboran y ello sólo puede lograrse manteniendo invariables las materias primas.

La materia viva, por el contrario, raramente es constante; los vegetales se adaptan y modifican en función del medio donde se desarrollan. ¿Cómo obtener entonces una barba de roble absoluta de calidad constante?

La historia de los perfumes va pareja a la de la humanidad: utilizados largo tiempo en bruto, las materias naturales olorosas han ido asociándose paulatinamente a productos más elaborados, a medida que se desarrollaban, por un lado, nuevos métodos de extracción de los principios olorosos y, por otro lado, avanzaban los métodos modernos de síntesis química.

Los primeros perfumes fueron de origen vegetal, obtenidos por combustión de gomas, resinas, líquenes o cortezas. El término "perfume" da testimonio de esa antigua práctica: procede del latín *per fumum*, "a través del humo".

Numerosos documentos dan fe de la utilización de los perfumes en la antigüedad, principalmente en Oriente. En los ritos primitivos se usaban especias reducidas a polvo fino y mezcladas, así como incienso, extraído de la terebintácea *Boswellia*: practicando una incisión en el tronco se recoge una emulsión blanca que amarillea al oxidarse y constituye el incienso. Destinados al culto, los perfumes se empleaban también en el cuidado de los enfermos —a menudo ejercen una intensa acción antimicrobiana— y el aseo personal. El arte de la perfumería propiamente dicho parecen haberlo conocido los chinos, hindúes, egipcios, hebreos, asirios y, más tarde, árabes, griegos y romanos.

En Egipto, unos 2000 años antes de nuestra era, los embalsamadores rellenaban los cadáveres con serrín de maderas olorosas y los envolvían con vendas empapadas de aceites perfumados; frotaban la piel con aceite de cedro y mirra (una goma producida por exudación del balsamero). Los principios olorosos, en forma de aceite o de grasa, se utilizaban también para el tocado, y en escritos antiguos se menciona el *kyphi*, una de las primeras aguas de tocador, que más tarde recuperarían los griegos y los romanos; según Plutarco, el perfume contenía unos 16 ingredientes, entre otros, mirra, azafrán, enebro y chipre (una composición procedente de la isla de Chipre pero sin relación directa con los productos modernos calificados de *chyprés*). Los hebreos se llevaron consigo las recetas que habían aprendido en Egipto, encontrándose en la Biblia numerosas referencias a sustancias perfumantes o a composiciones de perfumes.

Junto a la maceración de los productos naturales en agua, técnica de obtención de infusiones, se desarrolló muy pronto un método fundado en la gran afinidad que suelen presentar las moléculas olorosas con los aceites y las grasas; el "agotamiento" de las sustancias olorosas por los aceites grasos solía efectuarse en caliente, condición que aceleraba la velocidad de extracción. Esas dos técnicas se completaron con un descubrimiento fundamental realizado hacia el siglo IX en Arabia, el lugar de máxima proliferación de plantas, árboles y arbustos olorosos. Todo Oriente importaba de Arabia esencias aromáticas, flores, olíbano (o incienso macho), mirra, jazmín y rosa; tal encrucijada de olores lo fue también de técnicas: los árabes, que habían aprendido de los griegos el arte de la química y especialmente el de la destilación, aplicaron ese método a la creación de perfumes.

El médico y filósofo Avicena (980-1037) elaboró el primer método de extracción de aceites volátiles de flores que se servía del alambique, y se dice que fue el primero en fabricar el agua de rosas. La destilación de Avicena era una extracción de arrastre por vapor de agua: en un alambique se calentaba el agua que contenía las materias primas; al evaporarse aquélla, arrastraba con-

sigo los principios volátiles y, por condensación, se recuperaba un agua perfumada de la que a menudo se separaba un aceite más oloroso que el agua, el aceite esencial o esencia. La destilación se extendió rápidamente por Oriente y, de la mano de mercaderes italianos, los aceites esenciales, de gran valor comercial, entraron en Europa.

En el siglo XVI, en la región francesa de Grasse, donde se utilizaban ya diversas esencias para el curtido de pieles, se obtuvo por destilación la esencia de espliego. Aparece entonces en Francia, y sobre todo en París, la moda de los guantes perfumados. Catalina de Médicis, por ejemplo, hace que Renato el Florentino perfume sus guantes con algalia, almizcle y ámbar gris, sustancias animales conocidas desde la antigüedad. La algalia es una pasta de color amarillo claro que oscurece al envejecer y que segregan ciertas glándulas situadas en la región anal de un gato norteafricano. Periódicamente, raspando, se recoge la pasta, que desprende un olor que al profano le parecerá repugnante. Sin embargo, tras ese tufo fecal se enconde un fino aroma almizclado (debido a la civetona, macromolécula cíclica que contiene un grupo cetónico, CO). Por su parte, el almizcle se presenta en forma de glándulas del grosor de nueces de gran tamaño; las glándulas se encuentran debajo del abdomen del almizclero de Asia central, pero su precio es exorbitante, pues para hacerse con el almizcle es necesario matar el animal. Por último, el ámbar gris es una secreción patológica del tubo digestivo de ciertas especies de cachalote; se recoge despedazando los animales capturados o de la superficie del mar, pues flota. Su olor avainillado y suave carece de la nota animal característica y desagradable del almizcle o de la algalia.

Capital de los curtidos primero, Grasse fue convirtiéndose paulatinamente en la capital de los guantes perfumados y, después, de los perfumes. A partir del siglo XVII se perfeccionan los métodos de fabricación y de obtención de mezclas. Mejora en forma particular el arrastre por vapor de agua: ya no se disponen las materias primas directamente en el agua, sino sobre un doble fondo de rejilla, bajo el que se coloca el agua que se calienta; el vapor todavía se lleva consigo las sustancias olfatorias, pero la ventaja es triple: hay que calentar menos agua, la destilación es más rápida y se evita la descomposición de las moléculas olorosas por hidrólisis, es decir, por reacción con el agua. En el siglo XVII Madame de la Témoille se hace perfumar los guantes con agua de azahar y la condesa de Barry utiliza generosamente el agua de Colonia (compuesta de esencias de bergamota, limón, mandarina, azahar y *petitgrain*). Resulta dudoso el origen exacto del agua de Colonia; según parece, la preparación se debe a un milanés, Pablo de Feminis, que la habría inventado en 1690 en Colonia. Su sobrino se instalaría más tarde en París, con el nombre de Jean-Marie Farina y continuaría la fabricación; ese agua de Colonia sigue vendiéndose con el nombre de "Jean-Marie Farina".

A medida que evolucionaba la técnica de la perfumería se modificaba también la consideración jurídica de la profesión. En enero de 1614, Luis XIII cambió el título de los maestros guanteros: los nombra maestros perfumistas. En 1700 se cuentan 21 representantes que, para limitar la competencia, se reunirán en gremios. Formarán entonces una corporación propia, la de los perfumistas guanteros, y la elaboración de perfumes constituirá un secreto que guardarán celosamente.

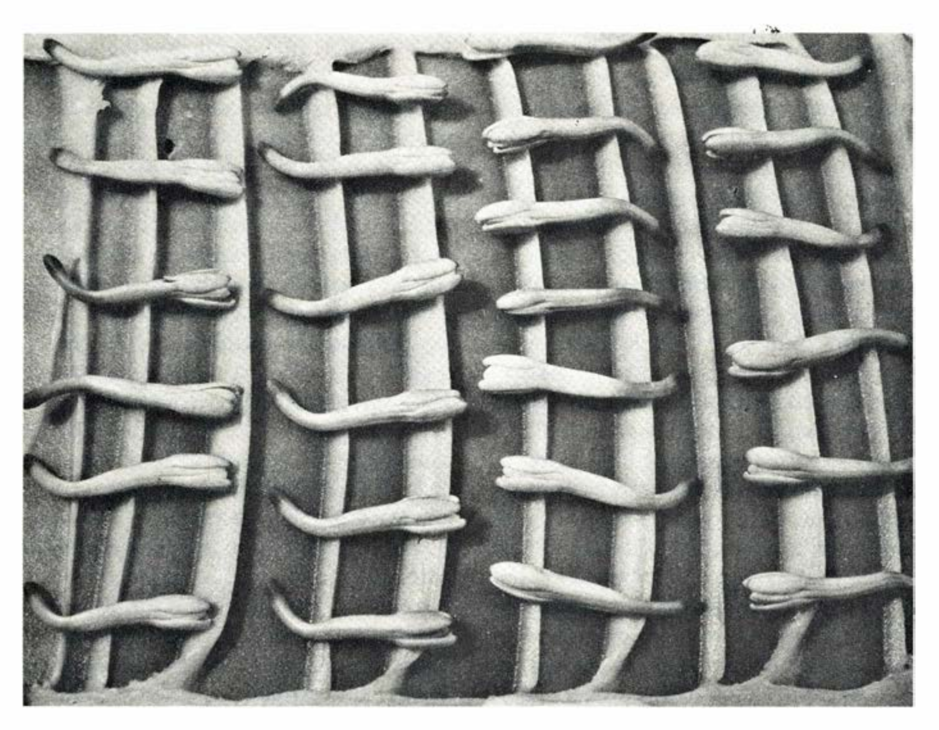
En el siglo XVIII la perfumería se transforma en industria: en Grasse se pasa de la manufactura del guante a la fabricación del perfume. Paralelamente se asiste a un nuevo desarrollo técnico: además de la expansión por Europa de las esencias obtenidas por destilación, aparece la extracción de las flores en frío, por medio de cuerpos grasos, sin contacto y sin inmersión.

El método, denominado "perfumado", se practica aún hoy de forma excepcional: sobre las dos caras de unas placas de vidrio se coloca una delgada capa de grasa animal muy refinada, compuesta en un 70 por ciento de manteca de cerdo y un 30 por ciento de sebo; a su vez, las placas se instalan sobre bastidores de madera, separadas unas de otras unos centímetros. Las flores se colocan a mano y con gran cuidado sobre la cara superior de las láminas, cuya grasa absorbe algunos de los productos menos volátiles; las sustancias volátiles se esparcen y se adsorben en la capa de grasa de las capas superiores e inferiores de las placas.

Cada 24 horas, en el caso del jazmín,



1. BARBA DE ROBLE, una de las principales materias primas de la perfumería. Se trata del liquen *Evernia prunastria*, que se recoge del tronco de los robles, sobre todo en la zona de la cuenca mediterránea. Se forman balas de unos 50 kilogramos, que se envían a los países consumidores, principalmente Francia, Suiza y Estados Unidos. Se almacena allí el producto durante unos cuatro meses, tras lo cual se extraen los principios olorosos y se obtiene la barba de roble absoluta, utilizada de base en numerosos perfumes modernos. En una recolección anual de unas 6000 toneladas de líquenes arbóreos, de las cuales 2000 son de barba de roble, se producen alrededor de 400 toneladas de barba absoluta de diversos árboles y 150 toneladas de barba de roble absoluta. Debido al gran consumo en mano de obra que exige la obtención del extracto absoluto, su coste resulta muy elevado: el kilogramo supera de largo el medio millón de pesetas.



2. PERFUMADO que permite recuperar los productos olorosos de ciertas flores muy frágiles. En la actualidad no se utiliza ya más que para el jazmín y el nardo. Se colocan con gran delicadeza las flores sobre placas de vidrio recubiertas de grasa y se superponen éstas sobre un bastidor de madera. Durante dos meses se cambian las flores con regularidad para, después, fundir la grasa al baño maría, decantarla y filtrarla.

y cada 72 en el del nardo, por ejemplo, se tiran las flores y se recargan las placas, operación que se repite hasta que hayan pasado dos kilogramos de flores por cada kilogramo de grasa, lo que suele durar un mes. Por fin se recoge la grasa perfumada, se funde al baño maría, se decanta y se filtra. Al enfriarse se obtiene una pomada que reproduce fielmente el olor de la flor, circunstancia que resulta especialmente importante en aquellas flores que, como el jazmín o el nardo, no dan principios olorosos por arrastre al vapor de agua. Una variante en caliente de este método permite extraer el perfume de las flores cuya producción olorosa cesa en el momento de la recolección, como la rosa o el azahar.

A finales del siglo XVIII se abren en París numerosas tiendas de perfumistas, entre las que destaca la de Fargeon, perfumista de María Antonieta, concentrándose el arte de la perfumería en los polvos, los afeites y los lunares postizos. En esa época las mujeres utilizan los cosméticos con generosidad, se colorean el rostro, llevan bolsitas perfumadas entre los vestidos y utilizan olores "higiénicos", como el de agua de rosas y el agua y vinagre de tocador. También suavizan la epidermis de las manos y el rostro con pomadas y se aplican en el cabello esencias de bergamota, naranja, romero, violeta, jazmín y junquillo, perfumes denominados aguas de olor.

Alrededor de 1800, el joven banquero Mulhens vendía una preparación que, etiquetada *Nº 4711*, habría de conquistar fama creciente. Ese agua de Colonia, como las que la precedieron, se vendía como medicamento, pero en 1810 Napoleón —incondicional del agua— decidió que los ingredientes de los medicamentos figuraran claramente en el frasco. Para guardar secreta la fórmula de *Nº 4711* se decidió vender el producto como agua tónica de uso externo. Peripecia que trae a colación el problema de la protección jurídica de los perfumes, inexistente todavía en la actualidad.

En el siglo XIX se sustituye el trabajo individual por el industrial, mejorando el procedimiento de destilación. Chaptal obtiene entonces el llamado alcohol "azeotrópico", de 95 grados, inodoro y neutro, que permite notables mejoras, pues sustituye al alcohol de 85 grados que se utilizaba desde 1809 para producir extractos de pomada, por mezcla con pomadas. Podían entonces idearse preparaciones totalmente nuevas, tanto para el lavado de pomadas como para las infusiones.

1870 asistirá a una revolución en perfumería: por evaporación del alcohol en vacío, Louis-Maximin Roure concentra los lavados alcohólicos obtenidos por el alcohol de 95 grados y obtiene "esencias concretas de pomada", solubles en alcohol. Exito al que siguieron innovaciones: se sustituye el alcohol etílico por otros disolventes, éter etílico o sulfuro de carbono, por ejemplo; sin embargo, pese a su gran interés, esos nuevos disolventes resultaban demasiado peligrosos, y se buscaron productos igualmente volátiles pero menos reactivos. Naudin y Schneider, en 1879, y Massignon, en 1880, acudieron a la naciente industria del petróleo en busca de los disolventes que necesitaba la perfumería, y su elección recayó especialmente en el éter de petróleo, una mezcla de hidrocarburos saturados líquidos y volátiles. Aparecieron así los "absolutos", análogos a las esencias concretas de pomada: se obtienen extrayendo las sustancias olorosas del éter de petróleo y evaporándolo después en vacío para, por fin, eliminar las ceras con alcohol.

El desarrollo de la química orgánica y la petroquímica ha ampliado sobremanera las posibilidades; se le ha ofrecido a la perfumería la oportunidad de reproducir moléculas olorosas originales, nuevas, desconocidas en la naturaleza. Esa etapa, última de la historia de la perfumería, no ha concluido, pues no se ha agotado aún el potencial de la química orgánica.

Las rosas no huelen como las violetas, pero resulta difícil establecer la diferencia, por la sencilla razón de que no existe un patrón que mida la intensidad de los olores comparable al que se dispone para el sonido o la luz. Ocurre, sin embargo, que el olfato es un sentido químico muy sensible, y los perfumistas lo poseen en grado desarrollado: en las composiciones perfumantes llegan a establecer incluso la dosis de los productos naturales presentes, logro que las máquinas no alcanzan sino de modo imperfecto, y su percepción puede alcanzar la diezmillonésima de gramo por litro de aire.

Cuando respiramos, el aire que pasa por los orificios nasales se calienta y filtra y franquea después tres huesos en forma de peonza dispuestos en zigzag en la parte superior de la nariz. Cuando se detecta un olor, se aspira vigorosamente la mayor parte del aire hacia lo alto, en dirección a las dos hendiduras que contienen los órganos del olfato, formado por dos piezas de tejido amarillento de unos dos o tres centímetros cuadrados de superficie, donde las terminaciones de dos fibras nerviosas detectan las moléculas olorosas. Las principales corresponden a las fibras del nervio olfatorio; ocupa sus terminales una célula olfatoria dotada de un rosario de filamentos parecidos a cabellos que actúan como receptores. El otro tipo de fibra es una prolongación larga y fina (especialmente sensible a las mo-

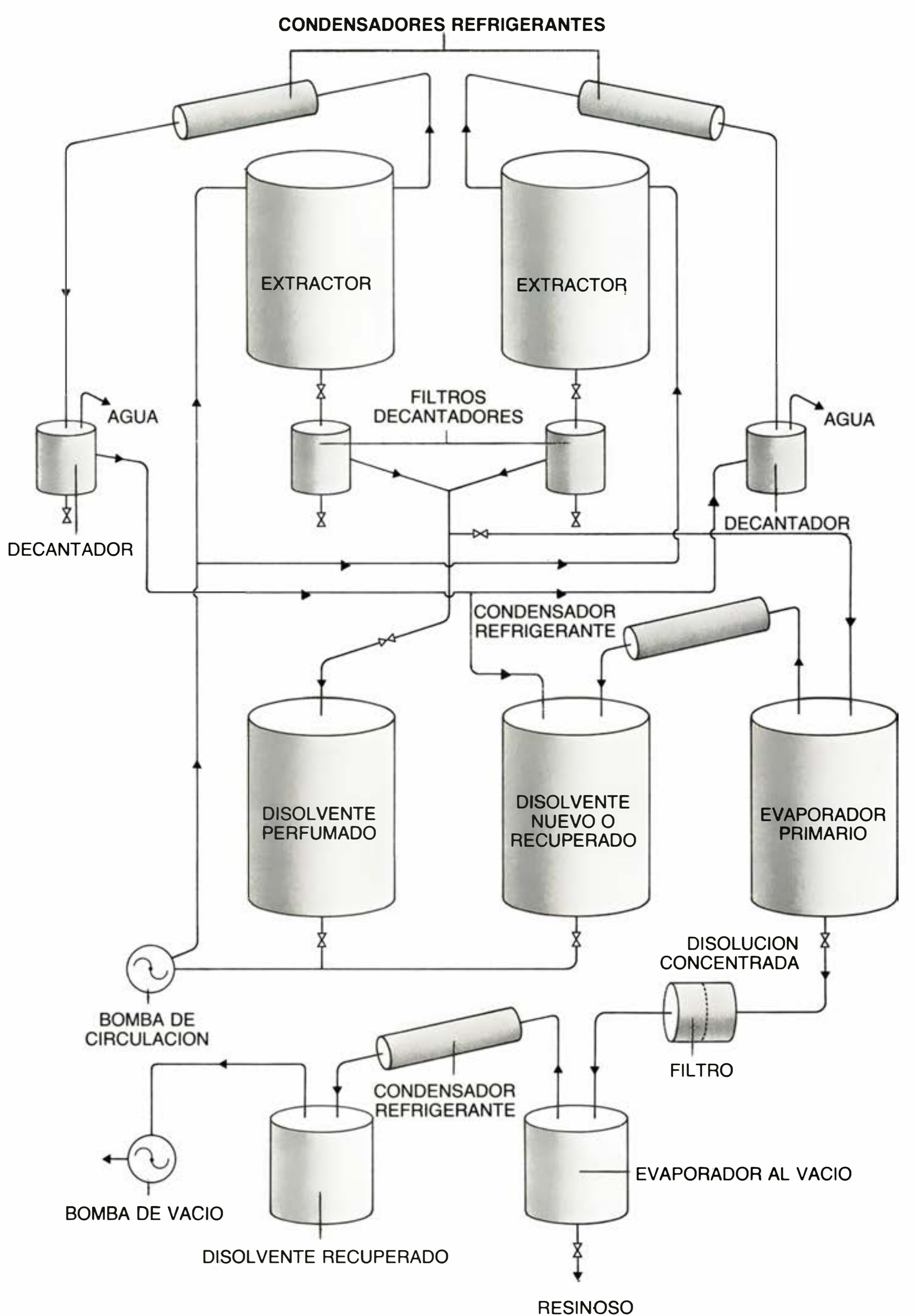
léculas olorosas agresivas) del nervio trigémino. Estimuladas por moléculas olorosas, las terminaciones del nervio olfatorio envían señales al bulbo olfatorio y, de allí, a los centros superiores del cerebro donde se procesan e interpretan las señales en términos de calidad e intensidad de olor.

Por la naturaleza del sistema olfatorio, para ser olidas las sustancias deben poseer ciertas cualidades. En primer lugar, volatilidad: las flores, por ejemplo, huelen mucho porque desprenden vapores que llegan hasta la nariz, pero los metales no huelen a temperatura ambiental porque ninguna de sus moléculas escapa al aire. En segundo lugar, solubilidad en agua, aunque sólo sea en cantidad ínfima; si es totalmente insoluble, no llega a las terminaciones nerviosas, que están rodeadas de una fina película acuosa. En tercer lugar, solubilidad en los lípidos, que les permita penetrar hasta las terminaciones nerviosas, a través de la capa lipídica de la membrana celular.

Aparte de esas propiedades elementales, las características químicas de las sustancias olorosas han permanecido confusas durante mucho tiempo. A lo largo del tiempo, los químicos han sintetizado empíricamente numerosos compuestos aromáticos, tanto para los perfumistas como para sus propias investigaciones sobre los olores. En lugar de aclarar la situación, esos nuevos trabajos más bien la complicaron, y ello pese al descubrimiento de algunos principios generales. El suizo L. Ruczicka, premio Nobel de química en 1939, descubrió, por ejemplo, que las moléculas macrocíclicas (de anillos muy grandes) poseían olor almizclado, de máxima intensidad cuando contenían entre 14 y 16 átomos de carbono.

Los químicos que analizan la estructura de las sustancias olorosas no disponen, todavía hoy, de una teoría definitivamente establecida sobre la relación entre la forma geométrica de las moléculas y su olor. En 1949, el escocés R. Montcrieff suponía que el sistema olfatorio se componía de receptores de varios tipos, cada uno de los cuales correspondería a un olor primario; las moléculas olorosas producirían su efecto, afirmaba, porque, insertándose en el interior de los espacios receptores de esas células, interactuarían con los receptores y los activarían. A. Holley, del laboratorio de fisiología neurosensorial de Lyon, ha restablecido actualmente esta hipótesis con supuestos mas sólidos.

¿Cuáles son los olores primarios? ¿Cuál es la forma del espacio receptor correspondiente? En 1952, John Amoore, del Departamento estadounidense de Agricultura, concluyó que existen siete olores primarios: alcanforado, amizclado, de flor, mentolado, de éter, picante y pútrido, y estableció la teoría estereoquímica de los olores. Supuso que la nariz disponía de siete tipos diferentes de receptores olfatorios —cavidades microscópicas de la membrana de la fibra nerviosa—, cada uno de los cuales presentaría una forma y tamaño específicos. Cada receptor aceptaría una molécula de una confi-



3. PARA EXTRAER numerosos productos naturales se utilizan disolventes volátiles, que respetan los constituyentes más frágiles y dan productos de olores más parecidos a la materia prima. Se comienza por macerar la materia prima con el disolvente, para que pasen a él las sustancias olorosas. A continuación se trasiega la solución perfumada, hasta un evaporador primario, donde se destila el disolvente. Simultáneamente se coloca un nuevo disolvente sobre la materia prima y se repite la operación; la extracción se repite hasta cinco veces en cada lote de materias primas. Por inyección de vapor, se destila luego la materia escurrida para recuperar la totalidad del disolvente. El vapor de agua arrastra el disolvente a un cuello de cisne y al condensador refrigerante colocado sobre el extractor. El producto de la destilación pasa a través del decantador y se expele. Mientras, en el evaporador primario, se ha llevado a cabo a presión atmosférica la destilación del primer lavado, concentrándose entre 50 y 100 veces el disolvente, que seguidamente se conduce, por aspiración a través de filtros, hacia un evaporador conectado al vacío. En este aparato se consuma la eliminación del disolvente destilando primero a presión atmosférica y después a presiones superiores. El producto final que se obtiene es líquido en caliente y sólido, o pastoso, en frío: la esencia. La purificación posterior consiste en una nueva extracción con alcohol etílico de 96 grados, filtración, refrigeración para mejorar la solubilidad del producto final por eliminación de las ceras vegetales, una segunda filtración y una postrera evaporación que da un producto perfectamente soluble en alcohol y de máxima concentración olorosa.

guración apropiada, según un mecanismo de encaje de llave y cerradura. Podría darse el caso de que ciertas moléculas se adaptaran a dos o más tipos de cavidades; o que por un lado se alojaran en un receptor amplio y, por el otro, en uno estrecho: el cerebro recibiría entonces la señal de un olor complejo.

Pese al éxito relativo de la teoría, el perfumista Jean-Carles, de Roure-Bertrand-Dupont, estableció una clasificación que se adapta mejor a las necesidades de los perfumistas, fundada en la velocidad de evaporación de las materias primas olorosas al disponerlas sobre una capa de celulosa, la "mouillette". Así, las sustancias olorosas más volátiles se definen como notas principales, las de volatilidad media son las notas medias y, aquellas cuya evaporación es muy lenta y dura a veces varios días, constituyen las notas de fondo [*véase la figura 4*]. Los productos de fondo determinan el carácter principal del perfume; su olor persistirá a lo largo de varias horas y contribuirá al éxito que logre entre el público. Esos productos, por ejemplo la barba de roble absoluta o las metilionona (moléculas con olor a violeta), resultan, en principio, poco agradables, pero tienen una excelente evaporación posterior. Se apreciará así la importancia de las otras dos categorías, las notas principales, que desprenden el olor de inmediato, en cuanto se abre el frasco, y las notas medias, que unen el olor inmediato de la composición perfumante a su exaltación horas más tarde. "No se puede ser perfumista si no se conoce esta clasificación, la única que permite crear un perfume de forma racional", escribe Jean-Carles. Lo comprobaremos creando una nota *chypré*.

El acorde fundamental será la barba de roble absoluta, que pertenece a la serie de los productos básicos, muy tenaces y poco volátiles. Escogeremos otros productos de esa serie, que acompañarán a la barba de roble y darán una pincelada original al perfume: por ejemplo, pueden elaborarse diversas combinaciones con ámbar gris, en función de las proporciones respectivas de los dos productos: 9 partes de barba de roble por 1 de ámbar gris, u 8 y 2, 7 y 3, 6 y 4, 5 y 5 (más allá de esa proporción se pasaría de un acorde de barba de roble a un acorde ámbar). Una vez escogido el "mejor" acorde de las cinco mezclas precedentes, se añade una pequeña cantidad de almizcle, para obtener el toque almizclado de la nota *chypré*. Si decidimos escoger seis partes de barba de roble absoluta, cuatro partes de ámbar gris y una de almizcle en acetona, habremos fabricado la base del acorde *chypré*.

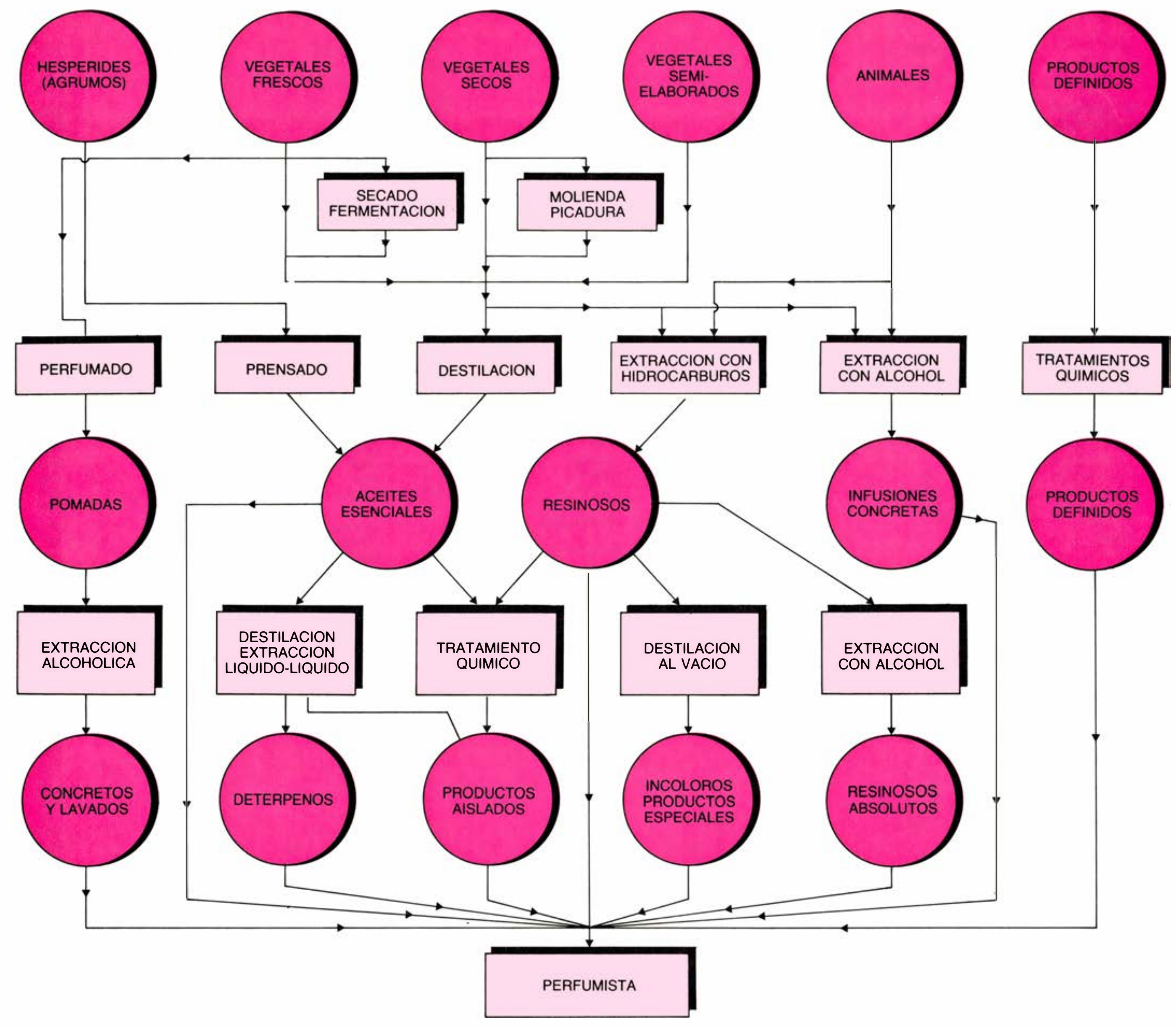
La elección de los modificadores y de las notas principales corregirá el efecto inmediato del acorde básico, cuyo olor inicial resulta desagradable. Adviértase que la nota de salida de un perfume nunca puede ser su nota característica, por lo que, en la elección, no debe dejarse influir por ella nada más destapar el frasco. Por ejemplo, si como modificadores tomamos rosa absoluto y algalia absoluto y, por notas principales, esencia de Portugal y esencia de bergamota, obtendremos una nota *chypré* con una nota principal (25 por ciento del total) de cuatro partes de esencia de Portugal y una parte de esencia de bergamota; con un modificador (25 por ciento del total) de tres partes de rosa absoluto y una parte de algalia absoluto y con una base (50 por ciento del total) de seis partes de barba de roble absoluta, cuatro partes de ámbar gris y una parte de almizcle en acetona. Lo que importa es que todo elemento que se añada transforme la fórmula original sin cambiar la nota, que debe seguir siendo *chypré*. La perfumería moderna se caracteriza por esos "acordes tipos", de los que existen numerosísimas interpretaciones.

La clasificación establecida por la Sociedad técnica de perfumistas de Francia define esas series olfatorias a partir de una nota típica: floral, ámbar, cuero, helecho o chipre. La nota *chypré*, por ejemplo, está ampliamente representada por múltiples interpretaciones [*véase la figura 6*]: según el caso, será florida, aldehídica, afrutada, de cuero o verde.

Toda nueva interpretación o innovación se funda en el descubrimiento de cuerpos olorosos realizados por la investigación orgánica. Los egipcios, por ejemplo, utilizaban ya el liquen en la fabricación del pan y el embalsamiento de los cadáveres, y en el siglo XVI se utilizó en perfumería en forma de polvos; el descubrimiento de los disolventes orgánicos permitiría su verdadero aprovechamiento en perfumería y, en 1917, su consagración con la creación del *Chypré*, de Coty. Por otro lado, el descubrimiento de la gamma-decalactona (molécula de olor a melocotón) permitió a Guerlain la creación de la primera variante *chypré*, *Mitsouko*, en 1919, y la primera interpretación de ese acorde. Merece citarse

PRODUCTOS PRINCIPALES PRODUCTOS MUY VOLATILES POCO TENACES	**MODIFICADORES DE LOS PRODUCTOS BASICOS** PRODUCTOS DE TENACIDAD Y VOLATILIDAD MEDIAS	**PRODUCTOS BASICOS** PRODUCTOS MUY TENACES Y POCO VOLATILES
Acetato de amilo	Albahaca	Metiliononas, Iononas
Palo de rosa	Terpineol	Azahar absoluto
Linalol	*Petitgrain* Paraguay	Salvia
Acetato de feniletilo	Galbano	Salicilato de amilo
Limón zeste	Verbena	Jazmín absoluto
Espliegos	Tomillo	Salicilato de bencilo
Bergamota zeste	Acetato de geranilo	Madera de cedro
Portugal zeste	Enebro	Aldehído C16
Coriandro	Tanaceta	Aldehído C18
Estragón	Alcohol feniletílico	Sándalo
Laurel noble	Geraniol	Cumarina
Petitgrain limonero	Espliego absoluto	Barba de roble absoluta
etcétera	Citronelal	Espicanardo y derivados
	Azahar	Pachuli
	Rosa de Oriente	Apio
	Ylang	etcétera
	Geranio	
	Aldehídos C8, C9, C11, C12	
	Clavo	
	etcétera	

4. LOS PERFUMES se fabrican siguiendo el método racional desarrollado por el francés Jean Carles a mediados del siglo XX. El método se funda en una clasificación de las sustancias olorosas en función de su volatilidad. El perfumista compone una fragancia eligiendo entre las aproximadamente 3000 materias primas, naturales o sintéticas, que tiene a su alcance. Los productos muy tenaces constituyen la nota de fondo y dan el verdadero carácter del perfume; los modificadores aseguran la transición entre las notas de fondo y las principales, responsables del olor inmediato. Las mezclas creadas se evalúan sobre cintas de celulosa.



5. METODOS DE EXTRACCION de los principios olorosos de las materias vegetales, que han progresado considerablemente gracias a los avances de la química moderna. Según las técnicas utilizadas se obtienen pomadas, aceites esenciales, productos resinosos o infusiones. El método principal de extracción es la destilación. Antaño se practicaba un arrastre por vapor de agua, pero hoy se lleva a cabo con disolventes volátiles: la baja temperatura de ebullición evita la descomposición de las moléculas olorosas más frágiles. Por su parte, el perfumado constituye un método muy antiguo, fundado en la intensa afinidad existente entre las grasas y los aceites y las moléculas orgánicas olorosas. Se obtiene así lo que se ha dado en llamar pomadas que, mezcladas en alcohol, dan los lavados alcohólicos, y después, por destilación del alcohol, los productos absolutos de las pomadas. El tercer método principal de extracción consiste en el prensado de las materias primas; este método se practica sobre todo en el caso de los hesperidios: limones, naranjas, mandarinas, bergamota, etcétera.

la creación, en 1889, de la *Fougère royale*, tras el descubrimiento, en 1868, de la cumarina (un aditivo que huele a heno utilizado en el tabaco); su asociación con la barba de roble absoluta dio origen a una nueva familia olfatoria, la de los helechos. Siguiendo con los ejemplos, la síntesis de las iononas y metiliononas, hacia 1898, permitió la creación de notas florales suaves: en 1905, la *Origan*, de Coty. El descubrimiento, en 1908, del hidroxicitronelal, a partir de la esencia de toronjil, dio paso, en 1912, a *Quelques fleurs*, de Houbigant; por último, el reciente descubrimiento del dehidrojasmonato de metilo, por asociación con un acorde *chypré* cuyo producto básico es la barba de roble absoluta, permitió la creación de la *Eau Sauvage*, de Christian Dior, en 1966. La barba de roble absoluta desempeña un papel de primer orden en la perfumería moderna, lo que ha animado a efectuar intentos de racionalizar su producción y de sintetizarlo; también se han buscado el elemento, o los elementos, que podrían hallarse en el origen de su especificidad olfatoria.

¿Qué es la barba de roble? Se trata de un liquen, es decir, un miembro de un grupo de organismos (de los que se conocen unas 15.000 especies) formados por la asociación simbiótica de dos especies totalmente independientes, un hongo y un alga. Las propiedades de los líquenes difieren mucho de las de esos dos grupos por separado, pues hongos y algas no se desarrollan si no es en medios muy húmedos, mientras que los líquenes que forman pueden crecer en una atmósfera seca, sobre rocas o en los árboles, en zonas áridas. En función de los talos que constituyan la parte fibrosa, los líquenes serán foliáceos, crustáceos, escamosos, gelatinosos o fruticulosos; los fruticulosos se incrustan sobre su sustrato, mientras que los foliáceos son más frondosos y se arrancan con mayor facilidad.

La barba de roble es un liquen fruticuloso, compuesto de talos muy ramificados, de ramas pequeñas y, en las extremidades, unidades que recuerdan

AMBARINOS

AMBARINO, FLORIDO, DE MADERA (*BOISÉ*)

Air Embaumé (Un)	Rigaud	1912
Nuit de Noël	Caron	1922
Habanita	Molinard	1924
Bois des Iles	Chanel	1926
Prétexte	Lanvin	1937
Shocking	Schiaparelli	1937
Charnade	Guerlain	1969
Expression	J. Fath	1977
Magie Noire	Lancôme	1978
Must du Soir	Cartier	1981
Nocturnes	Caron	1981
Parfum d'Hermès	Hermès	1984
Ysatis	Givenchy	1984
Dans la nuit	Worth	1985
Obsession	C. Klein	1985

AMBARINO, FLORIDO, ESPECIADO (*ÉPICÉ*)

L'Origan	Coty	1905
Après l'Ondée	Guerlain	1906
L'Heure Bleue	Guerlain	1912
Soir de Paris	Bourjois	1928
Vol de nuit	Guerlain	1933
Chasse Gardée	Carven	1950
Bal à Versailles	J. Despez	1962
Oscar de la Renta	O. de la Renta	1977
Raffinée	Houbigant	1982
Balahé	Léonard	1983
Poison	C. Dior	1985

AMBARINO SUAVE

Emeraude	Coty	1921
Shalimar	Guerlain	1925
Tabu	Dana	1931

SEMI-AMBARINO FLORIDO

Youth-Dew	E. Lauder	1952
Private Collection	E. Lauder	1973
J'ai Osé	G. Laroche	1977
Opium	Y. St.-Laurent	1977
Cinnabar	E. Lauder	1978
Dioressence	C. Dior	1979
"KL"	Lagerfeld	1982
Prélude	Balenciaga	1982
Kéora	Couturier	1983
Ruffles	O. de la Renta	1983
Coco	Chanel	1984

CHYPRES

CHYPRE FLORIDO ALDEHIDICO

Crêpe de Chine	Millot	1925
Fruit Vert	Florel	1930
Carnet de Bal	Revilon	1937
Nuit de Longchamp	Lubin	1937
Aphrodisia	Faberge	1938
Ma Griffe	Carven	1946
Calèche	Hermes	1961
Chant d'Arômes	Guerlain	1962
Fashion	Leonard	1970
Vivre	Molyneux	1971
Coriandre	Couturier	1973
Complice	Coty	1974
Halston	Halston	1974
Mystère	Rochas	1978
Versace	G. Versace	1981
Diva	Ungaro	1983
Shéhérazade	J. Desprez	1983
Trussardi	Trussardi	1984
Paloma Picasso	P. Picasso	1985

CHYPRE AFRUTADO

Mitsouko	Guerlain	1919
Cinq de Molyneux	Molyneux	1925
Rumeur	Lanvin	1932
Femme	Rochas	1944
Diorama	C. Dior	1949
Quadrille	Balenciaga	1955
Fête	Molyneux	1962
"Y"	Y. St.-Laurent	1964
Eau Sauvage	C. Dior	1966
Diorella	C. Dior	1972
Cristalle	Chanel	1974
Azzaro	L. Azzaro	1975
Choc	P. Cardin	1981

CHYPRE DE CUERO (*CUIRÉ*)

Sous le Vent	Guerlain	1933
Emir	Dana	1935
Landit	Piguet	1944
Jolie Madame	Balmain	1953
Gabochard	Gres	1959
Diorling	C. Dior	1963
Imprévu	Coty	1966
Miss Balmain	Balmain	1967
Cachet	Matchabelli	1970
Durer	Durer	1971
Empreinte	Courreges	1971
Sikkim	Lancôme	1971
Ellipse	J. Fath	1972
Red	G. Beene	1976
Ungaro	Ungaro	1977
J.-L. Scherrer	Scherrer	1980
Norell 2	Norell	1980
Missoni	Missoni	1982
Paradoxe	P. Cardin	1983
La Nuit	P. Rabanne	1985
Le Parfum Rare	Jacomo	1985

CHYPRE VERDE

Miss Dior	C. Dior	1947
Intimate	Revlon	1955
Vert et Blanc	Carven	1958
Vivara	Pucci	1966
Givenchy III	Givenchy	1970
Timeless	Avon	1974
Scophia	Coty	1980

CUEROS

Tabac Blond	Caron	1919
Cuir de Russie	Chanel	1924
Scandal	Lanvin	1932
Kobako	Bourjois	1936

FLORALES

SOLIFLOR ROSA

Rose	Molinard	1860
Rose Jacqueminot	Coty	1904
La Rose d'Orsay	D'Orsay	1908
Tea Rose	Perfumers's Workshop	1976

SOLIFLOR JAZMIN

Jasmin	Molinard	1860
Jasmin de Corse	Coty	1906
Jasmin	Le Galion	1940

SOLIFLOR MUGUETE

Le Muguet des Bois	Coty	1936
Lily of the Valley	Le Galion	1950
Le Muguet du Bonheur	Caron	1952
Premier Muguet	Bourjois	1955
Diorissimo	C. Dior	1956

SOLIFLOR CLAVEL

Bellodgie	Caron	1927

SOLIFLOR NARCISO

Narcisse Noir	Caron	1927

SOLIFLOR LILA

Apple Blossom	H. Rubinstein	1948

SOLIFLOR GARDENIA

Gardénia	Chanel	1925
Gardénia	Le Galion	1937

SOLIFLOR NARDO

Tubéreuse	Le Galion	1939
Fracas	Piguet	1948
Crescendo	Lanvin	1965
Chioé	Lagerfeld	1975
Jontue	Revlon	1975

SOLIFLOR VIOLETA

Vera Violetta	Roger et Gallet	1892
Violette Pourpre	Houbigant	1907
Violette de Toulouse	Berdoues	1937
Violette	Le Galion	1950

RAMILLETE FLORAL

L'Idéal	Houbigant	1900
Pompéia	L.-T. Piver	1907
Quelques Fleurs	Houbigant	1912
My Sin	Lanvin	1925
Rêve d'Or	L.-T. Piver	1926
Amour Amour	Patou	1928
Moment Suprême	Patou	1931
Je Reviens	Worth	1932
L'Air du Temps	N. Ricci	1947
Le Dix	Balenciaga	1947
Snob	Le Galion	1952
Capricci	N. Ricci	1960
Princesse d'Albret	J. D'Albret	1964
Super Estée	E. Lauder	1969
Charlie	Revlon	1973
Yendi	Capucci	1974
Unspoken	Avon	1975
Cardin	Cardin	1976
Flamme	Bourjois	1976
Blasé	M. Factor	1977
Valentino	Valentino	1978
White Linen	E. Lauder	1978
Anaïs Anaïs	Cacharel	1979
Métal	P. Rabanne	1979
Madame de Carven	Carven	1979
Symbiose	Stendhal	1980
Or Noir	P. Morabito	1981
Guirlandes	Carven	1982
Clair de Jour	Lanvin	1983
Fleurs d'Orlane	Orlane	1983
Les Jardins de Bagatelle	Guerlain	1983
Paris	Y. St.-Laurent	1983
Azzaro 9	Azzaro	1984
Lumière	Rochas	1984
Barygna	H. Rubinstein	1985
Maxim's	P. Cardin	1985

FLORIDO VERDE

Vent Vert	Balmain	1945
Grafitti	Capucci	1963
Câline	Patou	1964
Belle de Rauch	M. de Rauch	1966
Fidji	G. Laroche	1966
Chanel n.º 19	Chanel	1970
Norell	Norell	1970
Geoffrey Beene	G. Beene	1971
Variations	Carven	1971
Alliage	E. Lauder	1972
Cialenga	Balenciaga	1973
Inouï	Shiseido	1976
Shocking You	Schiaparelli	1976
Silences	Jacomo	1978
Vôtre	C. Jourdan	1978
Must de jour	Cartier	1981
Alix	Gres	1982
Fleur de Fleurs	N. Ricci	1982
Le Jardin	Max Factor	1983

FLORIDO ALDEHIDICO

Chanel n.º 5	Chanel	1921
L'Aimant	Coty	1927
Arpège	Lanvin	1927
Liu	Guerlain	1929
Sortilège	Le Galion	1937
Cœur Joie	N. Ricci	1947
Robe d'Un Soir	Carven	1947
Magie	Lancôme	1949
Detchema	Revillon	1953
Fath de Fath	J. Fath	1953
Casaque	J. d'Albret	1956
L'Interdit	Givenchy	1957
Madame Rochas	Rochas	1960
Parce Que!	Capucci	1963
Climat	Lancôme	1967
Calandre	P. Rabanne	1969
Evasion	Bourjois	1970
Infini	Caron	1970
Chicane	Jacomo	1971
Rive Gauche	Y. St.-Laurent	1971
Révillon IV	Révillon	1972
Farouche	N. Ricci	1974
Gucci !	Gucci	1974
Aviance	Matchabelli	1975
First	Van Cleef	1976
Tamango	Léonard	1977
Cléa	Y. Rocher	1981
Gauloise	Molyneux	1981
Ombre Rose	J.-C. Brosseau	1981
Un Jour	C. Jourdan	1982

FLORIDO, DE MADERA, AFRUTADO

Iris Gris	J. Fath	1947
Amazone	Hermes	1974
Quartz	Molyneux	1977
Lauren	R. Lauren	1978
Nahéma	Guerlain	1979
Molinard	Molinard	1979
Envol	T. Lapidus	1980
Ivoire	Balmain	1980
Turbulences	Révillon	1981
Armani	G. Armani	1982
"K"	Krizia	1982
Nombre Noir	Shiseido	1982
Courrèges in Blues	Courrèges	1983
Filly	Capucci	1983
Beautiful	E. Lauder	1985

HELECHOS

Fougère Royale	Houbigant	1882
Jicky	Guerlain	1889
Le Trèfle Incarnat	L.-T. Piver	1896
Maja	Myrurgia	1925
Flor de Blason	Myrurgia	1927
20 Carats	Dana	1933

hojas. Las tres especies de líquenes fruticulosos que importan en perfumería son *Evernia prunastria*, de cara superior blanca, la inferior verde claro y morfología general de cinta lisa; crece sobre todo en los robles, y en los árboles huele poco. El liquen *Evernia furfuracea* tiene gris una de sus caras y negro grisáceo la otra; resulta más duro al tacto y desprende un pronunciado olor a resina. Se encuentra en los pinos y cedros y cada racimo mide entre 30 y 40 centímetros de largo; su masa es de hasta 400 gramos. Por fin, *Usnea barbata*, o barba de capuchino, es más filiforme, se engrapa en las ramas de robles y árboles frutales, ramoso, enhiesto y a veces un poco desplegado. Es de color verde y puede alcanzar una longitud de cinco metros. De los tres, sólo el primero constituye la verdadera barba de roble; es la calidad más apreciada, mientras que los otros a menudo se mezclan durante la recolección.

La recolección del liquen se realiza a mano. Son países productores Yugoslavia, Marruecos, España, Francia, Italia y la Unión Soviética. La calidad de la barba de roble depende de la naturaleza de los bosques de donde se recoge, siendo especialmente buena la de las montañas del Atlas marroquí. La recolección anual es del orden de 6000 toneladas, de las que 2000 corresponden a barba de roble genuina; acabada la fabricación, se habrán obtenido sólo un centenar de toneladas de absoluto.

La recolección se efectúa en invierno y a principios de la primavera, antes de que aparezcan las hojas. Una vez secas y dispuestas en manojos, las barbas se expiden a los talleres de extracción, situados principalmente en los países consumidores: Francia, Suiza y los Estados Unidos. Las piezas, de unos 0,2 metros cúbicos, se guardan en almacén al menos durante cuatro meses, en depósitos donde se efectúa la primera etapa de la preparación del absoluto barba de roble, la "maduración" de los diversos principios olorosos. En efecto, los líquenes, muy resistentes, siguen vivos durante ese largo período, pero modifican su metabolismo: los dépsidos (moléculas sin olor) que contienen se degradan en productos olorosos. Los dépsidos son moléculas de por lo menos dos anillos de seis átomos de carbono, unidas por un grupo éster, COO; además, los anillos presentan diversos grupos químicos unidos a ellos. Durante la maduración, los dépsidos se disocian en moléculas de un solo anillo, formándose los productos olorosos. Las hidrólisis y fermentaciones bacterianas producen componentes volátiles mucho más simples: diversos terpenos, es decir, hidrocarburos de fórmula general $C_{10}H_{16}$, formados por la unión de subunidades de isopreno (constituido por una cadena de cuatro átomos de carbono, más otro enlazado a uno de los dos átomos de carbono centrales).

Tras la maduración de los principios olorosos, se cargan las piezas, de 50 kilogramos, en cubas de una capacidad comprendida entre los 2000 y los 6000 litros, y se humedecen con vapor, para incrementar la cantidad de productos olorosos. Esa etapa va acompañada de nuevas hidrólisis y alcoholisis (reacción con los alcoholes presentes en la solución), que favorecen la aparición de gran cantidad de moléculas de olor agradable. Se procede seguidamente a la extracción, que en la actualidad se efectúa con benceno o con éter de petróleo, y se repite la operación entera, hasta cinco veces por lote, escurriéndose en cada ocasión las materias vegetales.

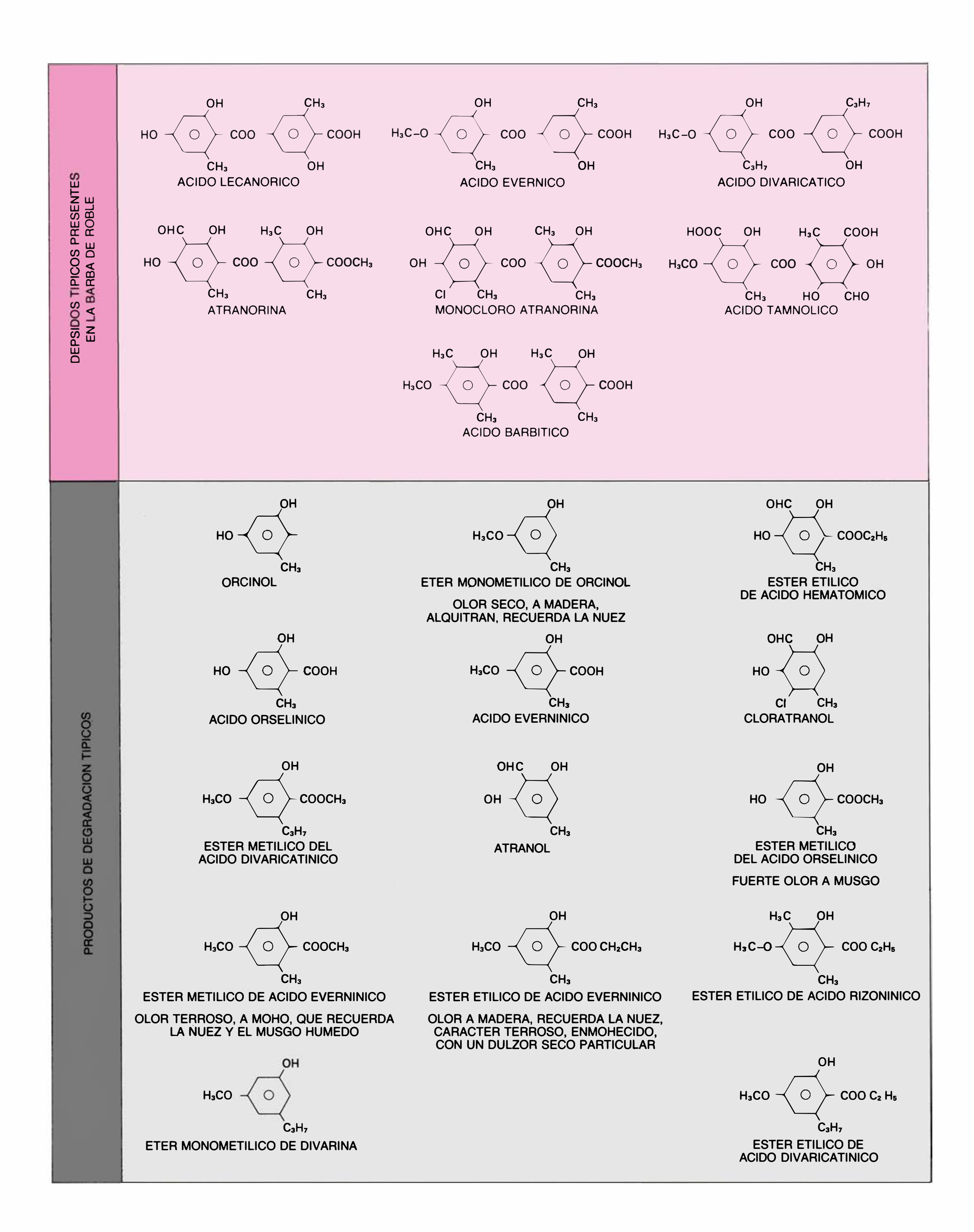
Tras la filtración del producto obtenido, se evapora el disolvente volátil y se recupera el extracto; por cada 300 kilogramos de barba se obtienen de 20 a 50 de un extracto resinoso, un líquido viscoso, de color desde naranja hasta verde oscuro y de olor muy característico, a tierra, moho, madera o especia. El extracto resinoso puede utilizarse directamente para el perfumado de jabones, mientras que, debido a la presencia de componentes insolubles en alcohol, debe realizarse una purificación antes de su utilización en los perfumes alcohólicos: si no se retiraran esos componentes, formarían poso en los perfumes.

Para obtener la barba de roble absoluta a partir del extracto resinoso se disuelve éste en caliente en alcohol de 96 grados y se enfría la mezcla; cristalizan así las ceras y los componentes sin valor olfatorio. Simultáneamente, con el alcohol reaccionan diversos constituyentes del extracto resinoso que acrecientan la potencia olfatoria: los ésteres aromáticos (moléculas que tienen un anillo bencénico, de seis átomos de carbono) se disocian en fenol y en éster etílico, de olor muy intenso. En la fase final se produce, por destilación del alcohol, un líquido viscoso, entre verde y marrón oscuro, con un fuerte olor a tierra, musgo, madera o especia: la barba de roble absoluta; el rendimiento de esta operación oscila entre el 65 y 75 por ciento. La evaporación de la solución alcohólica, tras la filtración, da entre 15 y 30 kilogramos de absoluto (siempre a partir de una masa de 300 kilogramos), cuyo olor resulta más consistente que el del resinoso.

La fabricación de un perfume propiamente arranca de los perfumes concentrados, como la barba de roble absoluta. La fórmula, creada por un perfumista siguiendo el método de Carles, se transmite al taller de fabricación, donde se encuentran los 3000 ingredientes que suelen emplear los perfumistas en su labor. La mayoría de los productos se almacenan en una atmósfera de nitrógeno, para protegerlos de los nefastos efectos del oxígeno, que modifica su olor.

La barba de roble absoluta, que entra a razón del 1 al 5 por ciento en muchas fórmulas, se pesa, junto con los demás ingredientes, en un complejo sistema formado por una balanza de precisión, la cuba de mezcla y una máquina de amasar. Se fabrican de 10 a 500 kilos de perfume por cuba y, mientras que la precisión de la fórmula por parte del perfumista es, a lo sumo, del 1 por 1000, la del fabricante alcanza fácilmente el 5 por 100.000. Tras un control olfatorio de calidad, que efectúa un perfumista, se procede a una cromatografía de gases y se entregan los perfumes concentrados a los destinatarios, que suelen incorporar el producto en una solución alcohólica para su posterior venta. Los destinatarios son muy diversos: fabricantes de perfumes, de detergentes, jabones, de productos de tocador o incluso de productos sanitarios. El uso y concentración dependerán del producto acabado. Para obtener un perfume se diluye el extracto de cuatro a seis veces en alcohol de 96 grados; para un agua de tocador el concentrado se diluye entre 6 y 20 veces en alcohol de entre 90 y 96 grados; para las lociones que se aplican tras el afeitado se utiliza el dos por ciento de concentrado en un alcohol de graduación comprendida entre 60 y 75. Por su parte, los jabones de gran lujo contienen del 4 al 5 por ciento de perfume concentrado, mientras que los jabones comerciales sólo llevan del 1,2 al 1,5 por ciento. Se ha descubierto que, en ocasiones, las evaluaciones olfatorias de los derivados de la barba de roble daban resultados muy bajos; el fenó-

6. CLASIFICACION DE LOS PERFUMES en cinco grupos principales: la familia floral, la de los *chyprés*, los helechos, los ambarinos y los cueros. Esos cinco grupos se dividen a su vez en subgrupos, distinguiéndose por ejemplo, los *chyprés* aldehídos, los fruticosos y los *chyprés* verdes. La ilustración adjunta recoge algunos de los ejemplos más conocidos de esos tipos de perfumes, así como el perfumista que lo comercializa y el año de creación (tomado de un documento de la Sociedad técnica de perfumistas de Francia).



7. DEPSIDOS, moléculas presentes en el liquen, que no huelen, pero cuya degradación produce moléculas que confieren a la barba de roble absoluta propiedades olorosas únicas. La degradación consiste, según los casos, en una hidrólisis, alcoholisis o fermentación bacteriana. Se indican aquí los principales dépsidos de la barba de roble, sus principales productos de degradación y el olor final de estos últimos. Se ha descubierto que la gran cantidad de ácido evérnico contenido en el liquen *Evernia prunastria* es la fuente de la mayoría de los elementos volátiles del extracto en alcohol. Esos constituyentes son, sobre todo, el everninato de metilo y de etilo, y el éter mono-metílico de orcinol, moléculas que contribuyen también al olor particular de los extractos de barba de roble.

meno se debe a que una parte importante de la población sufre anosmia respecto de numerosos componentes de la barba de roble: para esas personas, las moléculas no huelen. El objetivo, por consiguiente, radica en sintetizar las moléculas que capte todo el mundo.

La particular simbiosis entre algas y hongos que constituye la barba de roble rinde ciertas moléculas de importancia decisiva para su aplicación en perfumería. De las 199 moléculas identificadas en *Evernia prunastria*, 80 contribuyen a su olor. Más de la mitad de ellas se sintetizan ya en la actualidad, y sin embargo no se ha logrado aún la reproducción sintética del olor de la barba de roble. Se ha progresado considerablemente a partir del desarrollo de la cromatografía de gases asociada a la espectrometría de masas, que permite la identificación y dosificación de los ingredientes volátiles.

Los componentes no volátiles desempeñan un papel muy secundario en perfumería; son polisacáridos —de fórmula general $(C_6H_{10}O_5)_n$—: glucosa, manosa y galactosa que, al no ser solubles en benceno, se eliminan por filtración; la barba de roble contiene también ácidos (málico, cítrico, glicólico, esteárico y oleico), que confieren a la barba de roble una fuerte acidez.

Por el contrario, lo que dota a la barba de roble de gran interés es la presencia de productos orgánicos de varios anillos aromáticos (generalmente dos o tres) obtenidos por condensación del ácido orselínico: los dépsidos mencionados anteriormente. El más común es el primer antibiótico conocido (se utilizaba ya en la antigüedad): se trata del ácido úsnico, que se encuentra aproximadamente en un 3 por ciento en la barba de capuchino (*Usnea barbata*), si bien en perfumería esa molécula suele considerarse más bien un estorbo, pues no huele y poco a poco va cristalizando en las soluciones alcohólicas de las que no se ha eliminado cuidadosamente durante la purificación de la barba de roble absoluta. La gran cantidad de derivados del ácido evérnico contenidos en *Evernia prunastria* constituyen la principal fuente de olor del extracto alcohólico: everninato de metilo y de etilo y éter monometílico de orcinol. Acido evérnico aparte, otros productos de degradación de dépsidos contribuyen también a su olor: son productos de olor intrínsecamente discreto, pero a ellos se debe la cualidad única del olor *chypré* de la barba de roble.

Es probable que algunos de los pro-

COMPUESTOS

MONOTERPENOS OXIGENADOS

1,8 cineol (eucalipto)
Alfa-tuyona (herbal, especiada)
Beta-tuyona (herbal, especiada)
Alcanfor (alcanforado)
Linalol (floral)
Alcohol fenquílico (floral)
Terpineno-4-ol (floral, lila)
Borneol (alcanforado)
Alfa-terpinol (especiado)
Timol (especiado)
Transpinocarveol (pino)
Acetato de bornilo (no huele)
Isofitol (menta)
Carvona (violeta)
Menta *cerpue* (spearmint)
Ionona alfa y beta (violeta, floral)
Dihidrocarvona (menta)

CETONAS

6-metil-2-heptanona (desconocido en perfumería)
6-metil-5-hepteno-2-ona (desconocido en perfumería)
4,6-dimetil-3-octanona (desconocido en perfumería)
5,6-transdimetil-3-hepteno-2-ona (desconocido en perfumería)
2,6-cis-2-trans-2_2-alfa-irona (floral)
2,6-trans-2_1-trans-2_2-alfa-irona (violeta)
2,6-cis-2_1-trans-2_2-gamma-irona
Acetofenona (floral)
Parametilacetofenona (floral, almendra)
Valerofenona (floral, afrutada)

MONOTERPENOS

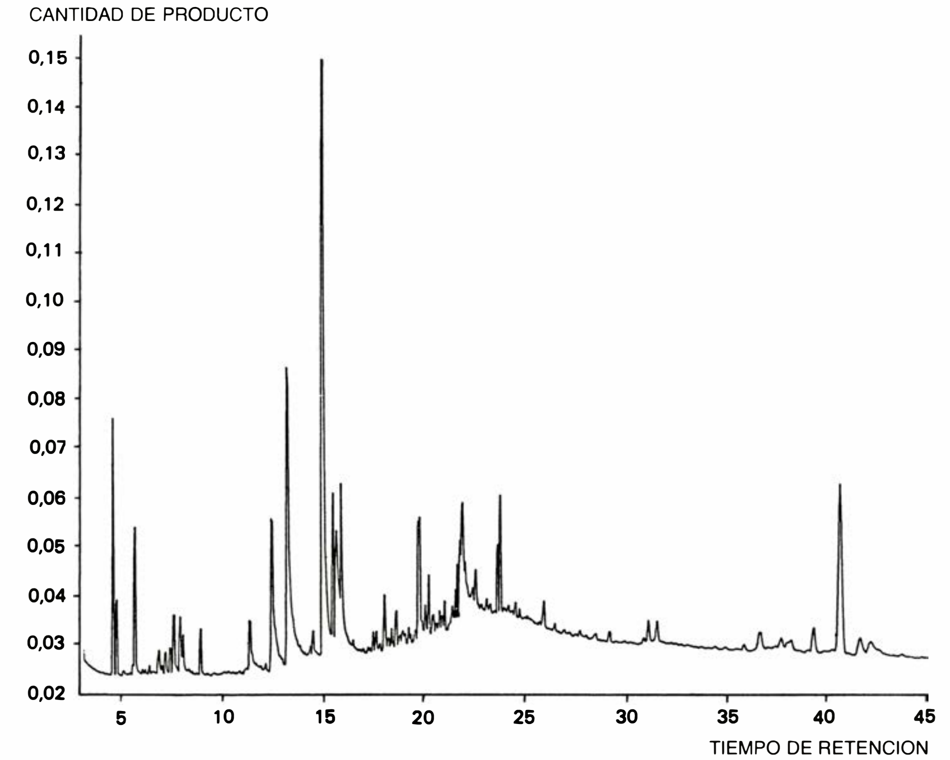
Alfa-pineno (de madera)
Beta-pineno (de madera)
Camfeno (de madera)
Mirceno (de madera)
Limoneno (hespéride)
Cimeno (pino)
Gamma-terpineno (pino)

ALDEHIDOS

n-Octanal (graso)
n-Nonanal (graso, floral)
n-Decanal (naranja)
n-Undecanal (floral, limón)
Benzaldehído (almendra amarga)
2,5-dimetil benzaldehído
[1-etil-2-pirrol] carboxaldehído
[l-Iso-amil-pirrol-2] carboxaldehído

SESQUITERPENOS

Beta-elemeno
Alfa-copaeno
Beta-gurjuneno
Beta-cariofilenos (de madera, pino)
Longifoleno (de madera, cedro)
Beta-humuleno
Alfa-muroleno
Beta-selinene
Farnesano
Alfa-guaiana (de madera, balsámica)



8. CROMATOGRAFIA DE GASES, que permite detectar los constituyentes de los extractos perfumados. De las 199 especies químicas identificadas en la barba de roble (por los picos del cromatograma), 80 huelen y en su mayoría se ha logrado sintetizarlas. En cualquier caso, se ignora si, entre los productos no identificados, alguno presente en cantidad muy reducida contribuye de manera decisiva al olor de la barba de roble absoluta. Hoy resulta imposible reconstituir a la perfección ese olor por métodos exclusivamente sintéticos, de ahí que la barba de roble natural siga utilizándose profusamente en perfumería. Algunos compuestos cuya síntesis ya se ha logrado, como el everninato de metilo o el éster monometílico de orcinol, sustituyen a la barba de roble absoluta en las preparaciones en las que el producto natural resulta demasiado caro.

ductos que contiene la barba de roble, terpenos incluidos, deriven de la madera de donde se ha recogido el liquen: no es fácil separar la madera de la barba. A los ingredientes que se encuentran en el inventario de vestigios de los extractos cabe atribuir el olor a madera, que se suma a la complejidad y belleza de las barbas. Según se ha comentado, los dépsidos no huelen, ni se les encuentra en ninguna otra forma de vida; se han identificado más de 80 en los líquenes y sus derivados son los responsables de la tan buscada nota *chypré* [*véase la figura 7*].

El coste de la mano de obra y del tratamiento encarece el precio de cualquier compuesto natural de los perfumes, y la barba de roble no constituye ninguna excepción a esa regla. Ello ha fomentado la realización de numerosos estudios sobre la composición de las calidades de barba de roble absoluta utilizadas en perfumería, hasta llegar a la síntesis de algunos de los componentes más importantes que crean ese olor característico: se produce hoy everninato de metilo y éter monometílico de orcinol. Los métodos de fabricación deben más a la industria farmacéutica que a la perfumería, y esos productos se utilizan como sustitutos del verdadero extracto absoluto en aquellas fórmulas en las que el precio del producto natural resulta excesivamente elevado.

Debido a la enorme complejidad de los componentes de la barba de roble, aun cuando se obtuvieran por síntesis química sus principales constituyentes, no reproducirían la riqueza del olor del producto natural. Incluso si se alcanzara a elaborar el 99 por ciento de las sustancias presentes en la barba de roble absoluta, el olfato distinguiría el producto natural del sintético.

¿Cómo evolucionará la perfumería? Aun cuando llegara a reproducirse y sintetizarse la casi totalidad de productos naturales, quedarían por resolver numerosos problemas. Citemos algunos. La volatilidad de un producto depende de la mezcla donde se encuentre; los modificadores, por ejemplo, se evaporan, según el caso, con las notas principales o con las de fondo, y no se puede prever aún la volatilidad que presentará una sustancia en un medio determinado. Tampoco la relación entre la intensidad olorosa de una molécula y su concentración en un disolvente, por ejemplo, en un medio alcohólico. Por último, el problema principal radica en la falta de información sobre la relación que guardan la estructura de las moléculas y su olor.

La enfermedad de Lyme

Una bacteria, transmitida a los humanos por la picadura de un ácaro, provoca un síndrome artrítico grave que podría estar mediado por la interleucina-1, uno de los reguladores del sistema inmunitario

Gail S. Habicht, Gregory Beck y Jorge L. Benach

La enfermedad de Lyme es una dolencia del verano. Se trata de una enfermedad bacteriana, trasmitida por la picadura de una garrapata y que suele contraerse sobre todo en los meses de junio a septiembre, cuando jóvenes y adultos pasan el tiempo al aire libre y caminan con las piernas desnudas por bosques y praderas.

Se está extendiendo con gran rapidez y, en la actualidad, es la enfermedad transmitida por garrapatas que se diagnostica con mayor frecuencia en Occidente y tal vez en todo el mundo. En 1975 se registraron 59 casos en Connecticut y, en 1985, la cifra había ascendido a 863. Más aún, la enfermedad de Lyme afecta ya a tres regiones norteamericanas: el Nordeste (en las zonas más costeras), la zona norte del Mediano Oeste (Minesota y Wisconsin) y el Oeste (algunas partes de California, Oregon, Utah y Nevada). La enfermedad se encuentra también por toda Europa y ha sido diagnosticada en Australia, la Unión Soviética, China, Japón y Africa.

Dado que sus síntomas pueden ser graves, desde un fuerte dolor de cabeza hasta alteraciones neurológicas y manifestaciones similares a las de la fiebre reumatoide, el mal ha suscitado gran preocupación a lo largo de los 12 años transcurridos desde que se describió por primera vez. El descubrimiento de la enfermedad, desde que se reconoció como entidad clínica hasta que se identificó su agente causal, constituye un triunfo de la moderna investigación médica y un tributo a los esfuerzos de colaboración entre no pocos científicos y expertos.

La primera información relativa a la enfermedad data de noviembre de 1975 cuando, en el Departamento de Sanidad del Estado de Connecticut, se recibieron sendas llamadas telefónicas de dos madres a cuyos hijos les acababan de diagnosticar una artritis reumatoide juvenil, terrible mal que puede provocar dolores que duran toda la vida, unidos a un debilitamiento físico; no era, pues, de extrañar la preocupación de las madres. Sin embargo, lo que alarmó a los miembros del Departamento de Sanidad fue que al parecer no se trataba de casos aislados; según las comunicantes, en la ciudad de Lyme se había diagnosticado recientemente artritis reumatoide a gran número de adultos y niños. Las autoridades sanitarias juzgaron que el caso no se reducía a un problema local y que quizá se tratara de algo muy serio: una toxina ambiental o el inicio de una epidemia, tal vez.

Se pusieron en contacto con Allen C. Steere, a la sazón becario postdoctoral que trabajaba en reumatología en la Facultad de Medicina de la Universidad de Yale. Acababa de completar un período de formación y prácticas en el servicio de epidemioogía del Centro norteamericano de Control de Enfermedades, de Atlanta. Intrigado por ese extraño brote de artritis, accedió a hacerse cargo de una investigación epidemiológica.

Steere y sus colaboradores descubrieron que la enfermedad afectaba a tres ciudades del este de Connecticut, Old Lyme, Lyme y East Haddam, comunidades adyacentes, situadas en la ribera oriental del río Connecticut. La artritis reumatoide juvenil suele constituir una enfermedad infrecuente, que sólo afecta a un niño de cada 100.000; sin embargo, sobre la población total de 12.000 personas de las tres ciudades, se había diagnosticado el mal en 39 niños (y 12 adultos), lo cual significaba una incidencia 100 veces superior a la normal.

Además, en las tres ciudades se repetía un mismo patrón de coincidencias. La mayoría de las víctimas habitaba en zonas muy boscosas y sólo unos pocos en centros urbanos. La mitad de los individuos afectados de Old Lyme y East Haddam se concentraban en cuatro carreteras, donde la frecuencia de la enfermedad era, en los niños, 10.000 veces superior a la normal: uno de cada 10, frente a la incidencia esperada de uno de cada 100.000. Era evidente que no se trataba de una forma ordinaria de artritis reumatoide, pero tampoco abundaban las pistas que pudieran guiar a Steere en su investigación. A pesar de ello, realizó varios hallazgos importantes.

El primero: la enfermedad no parecía ser especialmente contagiosa, ya que los miembros de una misma familia la contraían en años diferentes. Otro: todos los casos, independientemente del año en que se produjeron, presentaban los primeros síntomas durante los meses de verano, de junio a septiembre. Y el tercero: el 25 por ciento de los pacientes entrevistados recordaba haber sufrido un extraño exantema cutáneo una o varias semanas antes de la aparición de los síntomas similares a los de la artritis. Las descripciones de los exantemas guardaban un notable parecido; se habían iniciado como una pápula roja, un pequeño bulto, que gradualmente se iba expandiendo hasta formar una roncha de unos 10 a 50 centímetros de diámetro. El exantema solía aparecer en el pecho, en el abdomen, en la espalda o en las nalgas de la mayoría de los pacientes, señal de que el agente transmisor de la enfermedad sería, probablemente, algún insecto trepador (más que volador) o bien un arácnido, aunque ninguno de los pacientes recordaba claramente haber sufrido picadura.

A partir de esos hallazgos, Steere concluyó que estaba enfrentándose a una enfermedad todavía no reconocida, causada probablemente por

un virus y transmitida por un artrópodo (el grupo al que pertenecen los insectos, las arañas y las garrapatas) sin identificar. La denominó enfermedad de Lyme, o artritis de Lyme, por la ciudad donde se observó por primera vez. En 1975-76 empezó el ensayo de sueros de víctimas, en busca de anticuerpos específicos frente a 38 enfermedades transmitidas por garrapatas y frente a 178 virus transmitidos por otros artrópodos. Ni un solo ensayo dio resultado positivo.

En el transcurso de sus estudios sobre la enfermedad y su etiología, Steere tropezó con una interesante información. En 1909 se había descrito en Europa un fenómeno muy parecido. El médico sueco Arvid Afzelius describió un exantema cutáneo rojo que se iba extendiendo, en pacientes que habían sufrido la picadura de la garrapata *Ixodes ricinus*. Afzelius denominó la afección "erythema chronicum migrans" (ECM), que literalmente significa "erupción roja, crónica y migratoria".

El ECM parecía semejarse enormemente al exantema observado en los pacientes de la enfermedad de Lyme. Aunque carecía de los síntomas de tipo artrítico característicos de la enfermedad de Lyme, Steere concluyó que el ECM y la enfermedad de Lyme podrían estar estrechamente emparentados y poseer modos de transmisión similares.

Los médicos europeos habían combatido con éxito el ECM mediante penicilina, lo que abogaba por un origen bacteriano, y no vírico, del agente infeccioso. Sin embargo, no logró aislarse ningún microorganismo de las muestras de fluido tomadas de las articulaciones de paciente de la enfermedad de Lyme y sometidas a cultivo. Mientras tanto, el número de casos de la afección seguía aumentando.

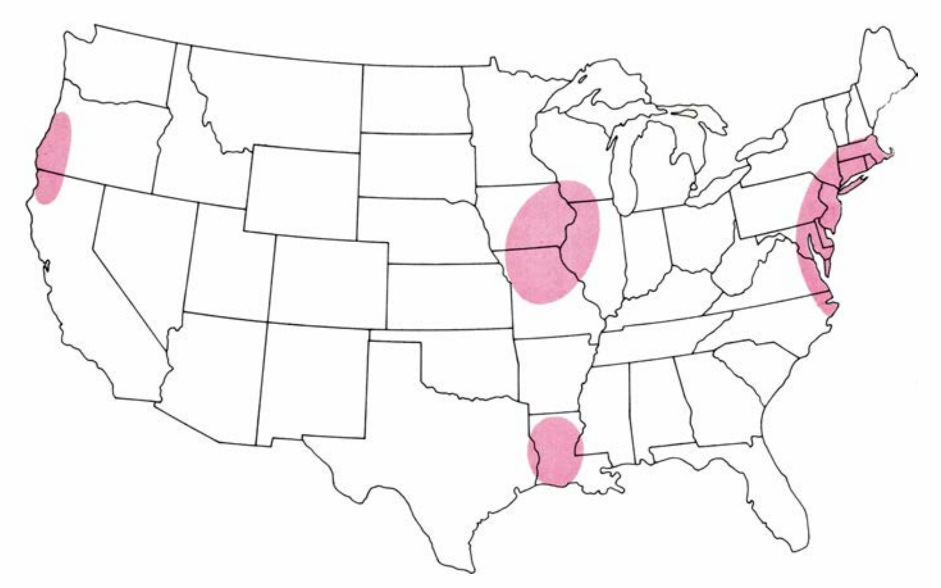
Finalmente, en 1977, nueve pacientes afectados ese año por el ECM recordaron haber sido picados por una garrapata en el sitio del exantema. Uno de ellos había recogido la garrapata, la había guardado y pudo entregársela a Steere para que la identificase. El ácaro, poco mayor que la cabeza de un alfiler, era de color marrón oscuro, de cuerpo duro, y podía confundirse fácilmente con una costra o una mota de polvo. No era de extrañar que Steere y su grupo tardaran casi dos años en localizarla.

Andrew Spielman, de la Facultad de Sanidad Pública de Harvard, identificó el organismo como *Ixodes dammini*, especie estrechamente emparentada con *I. ricini*, la garrapata responsable del ECM europeo. Identificada ya *I. dammini*, los investigadores que trabajaban sobre la enfermedad de Lyme esperaban aislar el verdadero agente de la infección. En primer lugar debía confirmarse que la garrapata era el vector de la enfermedad. Si la distribución natural de *I. dammini* se correspondía con los brotes de la enfermedad de Lyme, se fortalecerían las pruebas circunstanciales que ligaban a ambas.

Para trazar el mapa de distribución de *Ixodes* a lo largo del río, y al mismo tiempo averiguar de qué especies de mamíferos se alimentaba, los biólogos de Yale dispusieron trampas de animales a ambas márgenes del río Connecticut. La distribución de las garrapatas resultó ser la que esperaban: *Dermacentor variabilis*, una garrapata del perro, era igualmente común a ambos lados del río, pero *I. dammini* abundaba 12 veces más en la orilla oriental, cerca de Lyme, Old Lyme y East Haddam donde, según ya se sabía entonces, la enfermedad de Lyme era endémica. Los investigadores estaban convencidos de que *I. dammini* era el vector principal de la transmisión de la enfermedad de Lyme.



1. AVISO DE PELIGRO PARA LA SALUD expuesto en Amagansett, Nueva York; por todo el área de Long Island infectada de garrapatas se han distribuido muchas señales de ese tipo. La enfermedad de Lyme está aumentando rápidamente su frecuencia en las zonas boscosas donde abundan los mamíferos de los que se alimentan las garrapatas. A quienes desarrollan síntomas de la enfermedad se les aconseja que soliciten tratamiento médico cuanto antes.



2. LA ENFERMEDAD DE LYME continúa propagándose por los Estados Unidos. La mayoría de los casos se registran a lo largo de la costa noratlántica, desde Massachusetts hasta Carolina del Norte, en Minnesotta y Wisconsin, en Texas y a lo largo de la costa pacífica, en California y Oregon. Se han registrado casos dispersos en Arkansas, Florida, Georgia, Indiana, Kentucky, Maine, Michigan, Montana, Nevada, New Hampshire, Ohio, Tennessee, Utah y Vermont. Se indican en color las áreas de mayor incidencia.

Sin embargo, seguían sin identificarse los agentes responsables del ECM y de la enfermedad de Lyme. Los reiterados cultivos celulares y exámenes microscópicos de los órganos internos de la garrapata no lograron poner de manifiesto la presencia de bacterias u otros patógenos. Así las cosas, a finales de 1981 se declaró en Shelter Island, frente a la costa oriental de Long Island, un caso fatal de fiebre maculosa de las Montañas Rocosas, una enfermedad producida por una rickettsia y transmitida por la garrapata del perro. El Departamento de Sanidad del Estado de Nueva York envió un equipo de biólogos a la isla para que recogiesen garrapatas vivas. Dado que el vector normal, *Dermacentor variabilis*, no se encuentra en otoño, recogieron *Ixodes dammini* adultas y las enviaron a los Laboratorios de las Montañas Rocosas en Hamilton, Montana, para su estudio.

Allí, Willy Burgdorfer, autoridad internacional en enfermedades transmitidas por ácaros, aplastó el tubo digestivo de *Ixodes* y lo examinó al microscopio de campo oscuro. Para su sorpresa, encontró que el intestino no estaba repleto de las rickettsias que producen la fiebre maculosa de las Montañas Rocosas, sino de una espiroqueta larga, de forma irregular. Burgdorfer sabía que *I. dammini* se consideraba el probable vector principal de la enfermedad de Lyme, y también que aquellas espiroquetas no eran el agente infeccioso de la fiebre maculosa de las Montañas Rocosas. Sospechó entonces que tal vez esas bacterias fueran la causa de la enfermedad de Lyme. Afortunadamente, Alan G. Barbour, que se encontraba entonces en los Laboratorios de las Montañas Rocosas, logró cultivar las espiroquetas en un medio puro y las obtuvo en cantidad suficiente para someterlas a experimentación.

Los pacientes expuestos a un agente infeccioso poseen en su suero anticuerpos capaces de reaccionar con él; por consiguiente, un ensayo de la presencia de esos anticuerpos puede constituir un buen indicador de la infección. Se envió a Burgdorfer muestras de suero de pacientes de Nueva York infectados con la enfermedad de Lyme y se buscó en ellas la presencia de anticuerpos frente a las espiroquetas. A diferencia de lo que sucedió con la anterior serie de experimentos realizados por Steere, esta vez los resultados fueron positivos: los sueros mostraban una pronunciada respuesta a las bacterias, señal de que los pacientes habían sufrido infección por la espiroqueta.

En conejos se llevó a cabo un ensayo más directo de la patogenicidad de la espiroqueta. Sobre la piel afeitada de conejos albinos se colocaron garrapatas infectadas con espiroquetas y se comprobó que se alimentaban de la sangre de sus hospedadores. Al cabo de unas semanas apareció un exantema similar al del ECM y el examen microscópico de la piel del conejo en el lugar de fijación de la garrapata puso de manifiesto la presencia de espiroquetas vivas.

A partir de este momento, las investigaciones avanzaron con gran rapidez. En el verano de 1982, investigadores del Departamento de Sanidad del Estado de Nueva York y de Yale ya habían aislado espiroquetas de la sangre, piel y fluido cefalorraquídeo de las víctimas de la enfermedad de Lyme. Russell C. Johnson y sus colegas, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Minnesota, analizaron la espiroqueta de la enfermedad de Lyme y, a partir de su ADN, determinaron que se trataba de una especie nueva del género *Borrelia*. En 1984, y como homenaje a su descubridor, Burgdorfer, la denominaron *Borrelia burgdorferi*.

B. burgdorferi es una espiroqueta típica: unicelular y en hélice levógira (de rotación contraria a las agujas del reloj), de enrollamiento suelto. Su longitud promedio es de 30 micrometros (milésimas de milimetro) con siete pasos de rosca. Como la mayoría de las espiroquetas, es pequeña y de difícil detección: el diámetro de la célula oscila entre 0,18 y 0,25 micrometros, lo cual le permite atravesar muchos de los filtros diseñados para retener bacterias.

Tras la identificación inequívoca de *B. burgdorferi* como agente causal de la enfermedad de Lyme, podía ya trazarse su distribución en la naturaleza. Edward M. Bosler, del Departamento de Sanidad del Estado de Nueva York, encontró la espiroqueta en tejidos de varios mamíferos, incluidos el ratón de campo, otros roedores y ciervos, así como en todos los estadios de *I. dammini*.

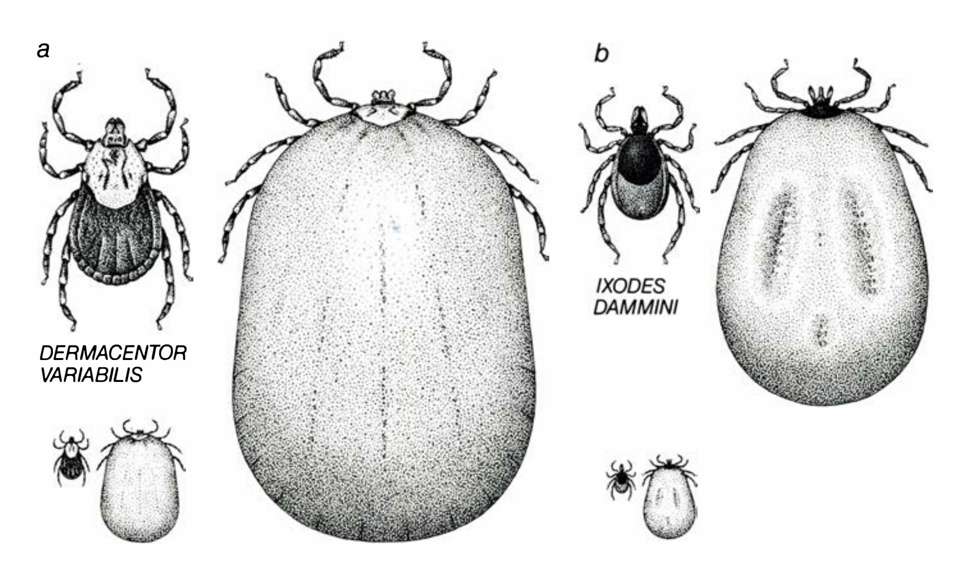
La detección de la espiroqueta en tejidos de mamíferos resulta difícil, y ello no sólo porque sea extremadamente pequeña, sino también porque suele presentarse en número muy reducido. De ahí que el método preferido para su detección fuera el uso de anticuerpos específicos contra *B. burgdorferi* marcados con fluoresceína, que se unen a las espiroquetas y emiten fluorescencia cuando se iluminan con luz ultravioleta, lo que posibilita la detección incluso de unas pocas. Los estudios indicaron que, después de penetrar en el torrente sanguíneo, *Borrelia* emprende un largo recorrido: ha sido detectada en los ojos, riñones, bazo, hígado, testículos y cerebro de hospedadores mamíferos no humanos, así como en varias especies de paséridos. (La distribución geográfica de la enfermedad de Lyme sugiere que la *Borrelia* se extiende cuando las garrapatas infectadas con la bacteria se adhieren a aves migratorias.)

Borrelia burgdorferi puede detectarse en el intestino de *I. dammini* mediante microscopía de campo oscuro, o bien recogiendo el contenido del intestino de la garrapata y cultivando las espiroquetas. Según las inspecciones realizadas a lo largo de la costa noratlántica de los Estados Unidos, entre el 80 y 90 por ciento de las garrapatas *Ixodes* poseen *B. burgdorferi* en su sistema gastrointestinal, en las áreas de elevada incidencia endémica. Por el contrario, sólo el tres por ciento de los *Ixodes* sometidos a ensayo en la costa occidental albergan la espiroqueta, hallazgo que se correlaciona bien con una incidencia mucho menor de la enfermedad de Lyme en esa zona.

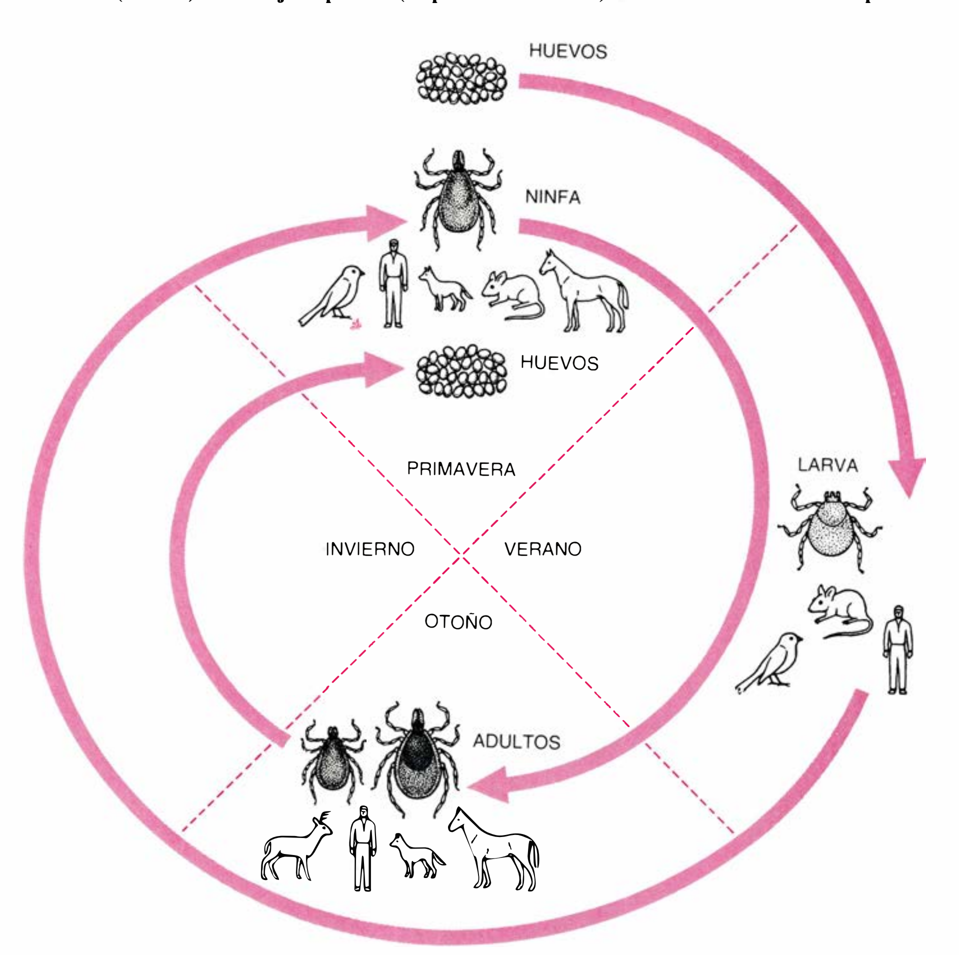
El ciclo biológico de *I. dammini* suele abarcar dos años. Los huevos se depositan en la primavera y su eclosión tiene lugar un mes más tarde, liberándose larvas de vida libre. Durante el primer verano las larvas se alimentan una vez (a lo largo de un período de dos días) con la sangre de un hospedador y luego entran en un estado de letargo que coincide con la llegada del frío otoñal. En la primavera siguiente, las larvas sufren una muda y entran en un segundo estado inmaduro, llamado de ninfa; de nuevo vuelven a fijarse a un animal hospedador, esta vez para alimentarse durante tres o cuatro días. Aunque las larvas y las ninfas atacan una amplia variedad de vertebrados, la mayoría de las garrapatas de esas edades suelen encontrarse sobre el ratón de pata blanca *Peromyscus leucopus*. Según parece, son precisamente las garrapatas de ese estadio las que con mayor probabilidad se fijan en las personas.

Al final del verano las ninfas mudan y pasan al estado adulto. Pueden encontrarse en matorrales, a un metro del suelo, desde donde atacan fácilmente a los mamíferos de mayor tamaño. Al igual que las garrapatas inmaduras, las adultas se alimentan de muy distintos hospedadores mamíferos, si bien en la parte nororiental de los Estados Unidos se encuentran preferentemente sobre el ciervo de cola blanca, *Odocoileus virginianus*. Las garrapatas adultas se aparean sobre el hospedador poco después de que la hembra se le ha adherido. Solamente las hembras sobreviven al invierno; los machos mueren poco después del apareamiento. No se sabe dónde se depositan los huevos, que eclosionan en primavera, repitiéndose entonces el ciclo.

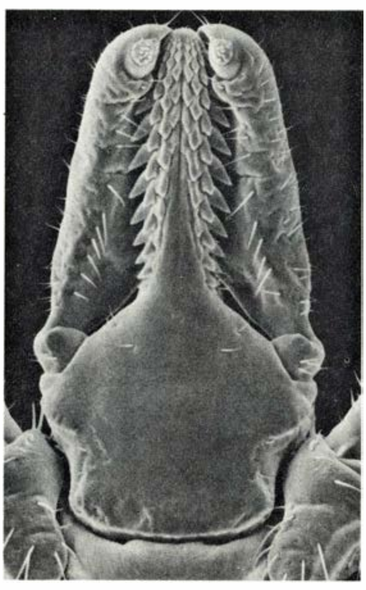
Cualquiera que habite o visite un



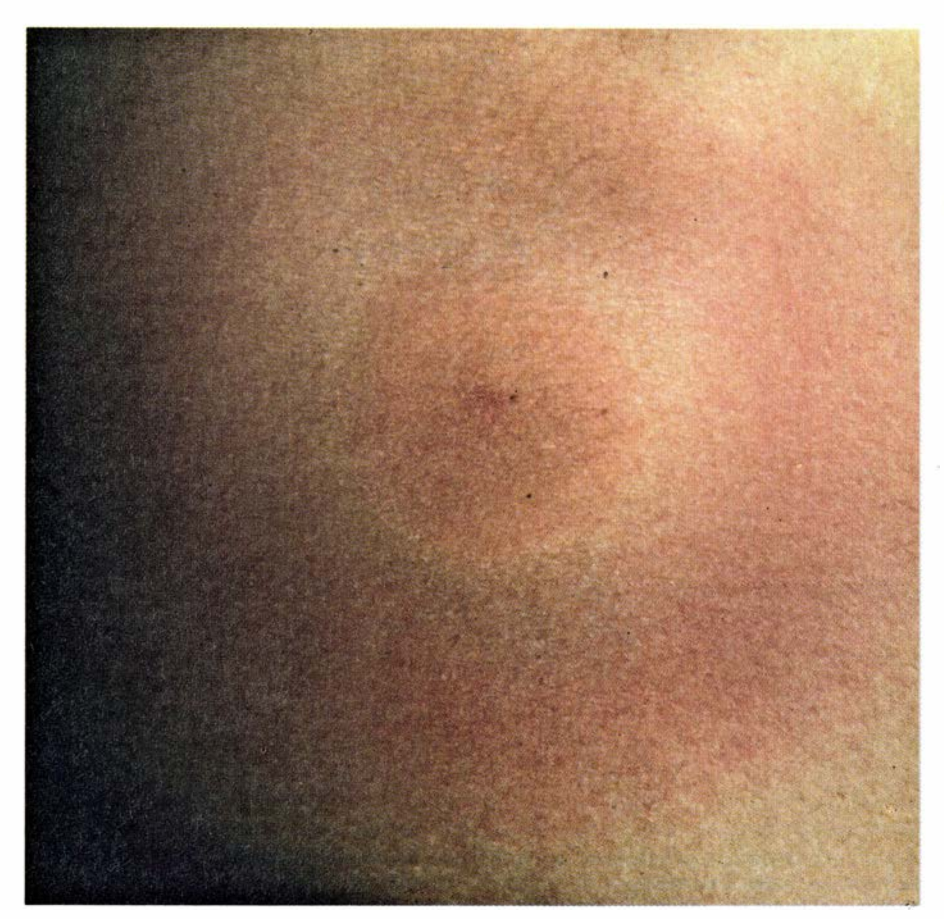
3. ACAROS COMUNES PORTADORES DE LA ENFERMEDAD en los Estados Unidos; la garrapata del perro, *Dermacentor variabilis* (*a*), que transmite la bacteria que causa la fiebre maculosa de las Montañas Rocosas, y la garrapata del ciervo, *Ixodes dammini* (*b*), que transmite la espiroqueta de la enfermedad de Lyme. Ambas especies se alimentan de la sangre de los hospedadores mamíferos, incluidos los seres humanos, y pueden triplicar su tamaño después de una ingesta. Los dibujos inferiores muestran el tamaño real de ambas y comparan ejemplares que no se han alimentado recientemente (*izquierda*) con garrapatas atracadas de comida (*derecha*). Los dibujos superiores (ampliados cuatro veces) muestran detalle anatómico superior.



4. CICLO BIOLOGICO de *I. dammini*, que en Nueva Inglaterra dura dos años. Los huevos se depositan en primavera; varias semanas más tarde emergen las larvas (que sólo tienen seis patas y resultan indistinguibles a simple vista). Las larvas se alimentan una única vez durante el verano, habitualmente de la sangre de micromamíferos, como ratones. En la primavera siguiente las larvas sufren una muda y pasan a ninfas, algo mayores y de ocho patas, que también se alimentan una sola vez durante el verano —de ratones o mamíferos de mayor tamaño, como perros, ciervos o seres humanos—, sufriendo posteriormente otra muda que, en otoño, las convertirá en adultos. Poco después mueren los machos; las hembras continúan alimentándose, para obtener la proteína que requiere el desarrollo de los huevos, ponen los huevos y mueren.

5. MICROGRAFIAS DE UNA HEMBRA de *I. dammini*, tomadas al microscopio electrónico de barrido, que muestran una perspectiva dorsal del organismo aumentado 26 veces (*izquierda*) y la zona próxima a la cabeza, en visión ventral aumentada 120 veces (*derecha*). Las patas, largas y segmentadas, poseen en sus extremos garras y placas adherentes que ayudan a la garrapata a mantenerse colgada de su hospedador mientras se alimenta. La cabeza consta de un pequeño cráneo y una gran probóscide, denominada hipostoma, rodeada de palpos sensores. El hipostoma taladra la piel del hospedador y penetra hasta llegar a un capilar, para sacar entonces sangre del hospedador y entregársela a la garrapata. La superficie aserrada del hipostoma le ayuda a anclarse en el lugar después de haber perforado el vaso sanguíneo. Los palpos, dispuestos uno a cada lado del ácaro, son órganos sensores cubiertos de pelos y otros receptores, que permiten localizar la víctima adecuada, de sangre caliente. Las fotografías las tomaron Stanley F. Hayes, Willy Burgdorfer y M. D. Corwin, de los laboratorios de las Montañas Rocosas en Hamilton, estado de Montana.



6. PRIMERA ETAPA de la enfermedad de Lyme, muy aguda, observada en el 60 por ciento de los individuos que han sufrido la picadura de garrapatas infectadas del género *Ixodes*. Aparece un gran exantema circular, que se expande radialmente desde el sitio donde picó el ácaro (que aquí aparece como una pequeña pálpula roja) y está muy hinchado en el centro. El exantema de la espalda del paciente mide 14 centímetros de diámetro. La fotografía ha sido proporcionada por el Departamento de Sanidad del Estado de Nueva York.

área donde la enfermedad de Lyme es endémica es susceptible de contraerla. El mal ataca de modo indiscriminado: afecta a ambos sexos y a todos los grupos de edad. Aunque es desproporcionado el número de niños que lo contraen, ello puede ser un mero reflejo de que pasan más tiempo que los adultos jugando en zonas boscosas. Se ha comprobado también que los dueños de animales que viven fuera de casa están expuestos a un riesgo mayor de padecerla, aunque no está claro si ello se debe a que pasan más tiempo al aire libre o a que les pican garrapatas adheridas a la piel de sus animales domésticos. La enfermedad de Lyme se está convirtiendo también rápidamente en un problema veterinario: en áreas endémicas, los perros y los caballos presentan debilitamiento en las articulaciones, que los veterinarios atribuyen a *Borrelia burgdorferi*.

Desde el punto de vista clínico, la enfermedad de Lyme puede dividirse en tres etapas. La primera y más obvia se caracteriza por el erythema chronicum migrans, que se desarrolla entre 2 y 30 días después de que el individuo haya sufrido la picadura. A menudo el exantema va acompañado de un profundo cansancio, fiebre, escalofríos, dolor de cabeza y dolor de espalda. En algunos pacientes, sin embargo, no llegan a manifestarse esos síntomas, ni siquiera el ECM. Entre el 25 y el 50 por ciento de los casos padecen lesiones secundarias en varios sitios del cuerpo. Dado que éstas carecen de pápulas rojas bien diferenciadas en su centro, probablemente se deban a la dispersión de las espiroquetas a través del torrente sanguíneo, y no a nuevas picaduras.

La segunda etapa (que tampoco se expresa siempre) se caracteriza por complicaciones neurológicas y dolores migratorios de los músculos esqueléticos. Aproximadamente el cinco por ciento de los pacientes presenta dificultades cardiacas que duran de tres días a seis semanas. Sufren palpitaciones, desvanecimientos o ahogo asociados a la aparición de irregularidades en los impulsos eléctricos del corazón (bloqueo aurículo-ventricular) y algunos necesitan temporalmente un marcapasos.

El tercer estadio corresponde típicamente a la aparición de la artritis. En un 60 por ciento de los pacientes de la enfermedad de Lyme que no han recibido tratamiento médico se presentan problemas en las articulaciones, carac-

terísticos de la artritis reumatoide; suelen iniciarse unos meses después del ECM, siempre antes de los dos años. Los ataques de artritis duran entre unos días y unas semanas y afectan primordialmente a las rodillas (lo cual puede causar dificultades en el andar) y a otras articulaciones grandes.

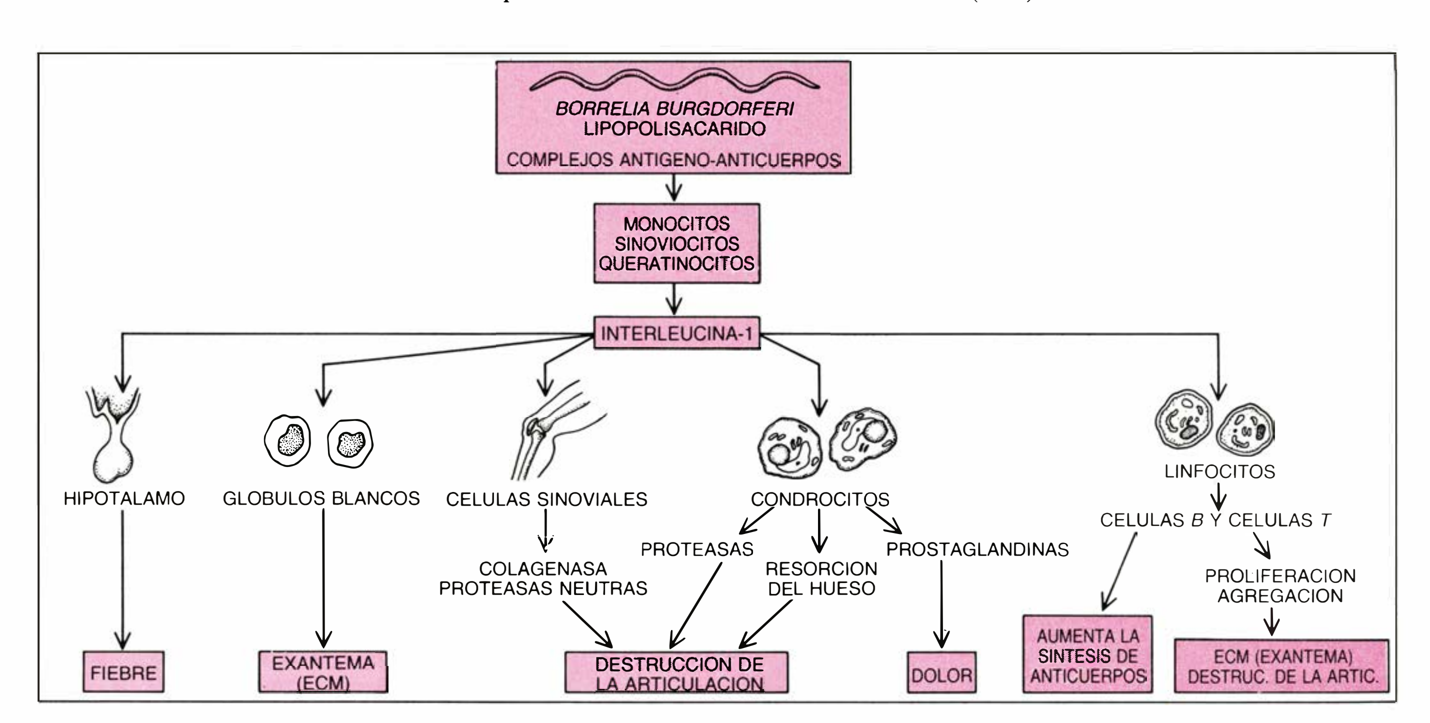
En cualquiera de los estadios de la enfermedad puede resultar interesado el sistema nervioso: se han detectado espiroquetas vivas en el líquido cefalorraquídeo y en tejidos del cerebro de pacientes a los que se había diagnosticado la enfermedad. Las jaquecas episódicas y extremadamente dolorosas y los dolores de cuello que experimentan durante la primera etapa de la enfermedad parecen ser consecuencia de la irritación de las meninges, las membranas que envuelven el cerebro. Durante la segunda etapa, el 15 por ciento de los pacientes desarrollan complicaciones neurológicas más graves: meningitis, inflamación de los nervios del cuello y parálisis de Bell, una paralización del séptimo nervio craneal, que controla muchos músculos faciales. Algunos pacientes experimentan una enorme sensibilidad cutánea al tacto o a los cambios de temperatura. Durante la tercera etapa, un pequeño porcentaje de pacientes sufre también somnolencia, pérdida de la memoria, cambios súbitos de humor e incapacidad de concentrarse.

Afortunadamente, la enfermedad de Lyme puede tratarse con éxito en cualquiera de sus estadios utilizando antibióticos de amplio espectro administrados oralmente, entre los que figuran la penicilina, la tetraciclina y la eritromicina. Los estudios en curso indican que también resultan eficaces los antibióticos del grupo de las cefalosporinas. El tratamiento durante la primera etapa de la enfermedad reduce, en gran medida, la posibilidad de complicaciones neurológicas, cardiacas o artríticas. Aun cuando se deje sin tratamiento hasta la tercera etapa, en la mayoría de los pacientes puede erradicarse la enfermedad mediante una terapia antibiótica, si bien resulta necesaria a veces la hospitalización de los afectados y la administración de los antibióticos por vía intravenosa.

Los médicos que tratan a pacientes con la enfermedad de Lyme han observado un fenómeno inusual. Inmediatamente después de la terapia antibiótica se aprecia una exacerbación transitoria de los síntomas. Este fenómeno, conocido como reacción de Jarisch-Herxheimer, se advirtió ya en el siglo XVI en pacientes de sífilis tratados con pomadas de mercurio. La sífilis está también causada por una espiroqueta, *Treponema pallidum*, y comparte varios síntomas con la enfermedad de Lyme, incluidos los exantemas y las complicaciones articulares y neurológicas. Se ha observado asimismo la reacción de Jarisch-Herxheimer después del tratamiento de otras infecciones por espiroquetas, así la fiebre recurrente. Esa reacción nos ha facilitado una importante clave para dilucidar la patogénesis del mal.

Importa destacar que, aunque el número de espiroquetas sea escaso, los afectados por la enfermedad de Lyme experimentan una amplia gama de síntomas. Para explicar esa circunstancia se han propuesto dos teorías sobre la patogénesis de la enfermedad; en ambas está implicado el sistema inmunitario y ambas parecen verosímiles. Sostiene la primera que en las articulaciones del paciente se acumulan complejos inmunitarios formados por antígenos de la espiroqueta y anticuerpos y complemento del hospedador humano. A su vez, los acúmulos atraen a neutrófilos (glóbulos blancos fagocíticos), que liberan varias enzimas que atacan a los complejos antígeno-anticuerpo. De acuerdo con esta hipótesis, la enzima liberada por los neutrófilos ataca las articulaciones y erosiona el hueso y el tejido de los cartílagos, con síntomas semejantes a los de la artritis.

El trabajo realizado en nuestro laboratorio de la Universidad estatal de Nueva York en Stony Brook sugiere una segunda hipótesis. A nuestro entender, los efectos patológicos de las espiroquetas no sólo los amplifican las enzimas secretadas por los neutrófilos, sino también el mediador del sistema inmunitario denominado interleucina-1 (IL-1).



7. LIPOPOLISACARIDOS de la espiroqueta *Borrelia burgdorferi*. Desencadenan la liberación de interleucina-1 (IL-1), que desempeña un papel principal en la patogénesis de la enfermedad de Lyme. La IL-1 actúa sobre varios órganos y células, desencadenando síntomas tales como exantema, fiebre y artritis, que caracterizan a las etapas primera, segunda y tercera de la enfermedad de Lyme. La espiroqueta (*arriba*) aparece en esta figura aumentada unas 1000 veces.

La IL-1, proteína de un peso molecular de 17.000 dalton, se sintetiza primordialmente en las células fagocíticas de la sangre llamadas macrófagos. Constituye un regulador de la respuesta inmunitaria del organismo y actúa de orquestador molecular de los mecanismos de defensa no específicos que se desencadenan frente a mútiples agresiones ambientales. Coordina la reacción corporal ante infecciones bacterianas y traumatismos, pues regula la aparición de la fiebre, la liberación de neutrófilos por parte de la médula ósea y la proliferación de fibroblastos (células del tejido conjuntivo).

Uno de los más potentes estímulos para la liberación de IL-1 es un lipopolisacárido (LPS) (un complejo de moléculas de azúcar y de lípido) que se encuentra en la envoltura externa de la pared celular de todas las bacterias gramnegativas. Dado que *Borrelia burgdorferi* es una bacteria gramnegativa, los autores postularon que podría contener LPS capaz de desencadenar la liberación de IL-1, la cual, a su vez, ejercería potentes efectos locales y sistémicos sobre el cuerpo humano.

Abordamos nuestra hipótesis desde distintos ángulos. En primer lugar, debíamos demostrar que la pared celular de *B. burgdorferi* contenía LPS. Con tal fin cultivamos espiroquetas y, tras recogerlas en gran cantidad, ensayamos en ellas la presencia de LPS. Una vez confirmado que, en efecto, lo contenían, aplicamos un método de extracción química para aislarlo. Al final del procedimiento habíamos obtenido extractos puros del LPS de *Borrelia* con los que podíamos someter a comprobación nuestra teoría.

Realizamos dos series de experimentos. En la primera, inyectamos LPS puro en personas y conejos. Los resultados fueron sorprendentes: los conejos que habían recibido LPS por vía intravenosa presentaban fiebre al cabo de unas pocas horas; los conejos y las personas que habían recibido inyecciones intradérmicas de LPS desarrollaron un exantema del tipo ECM

En nuestra segunda serie de experimentos pretendíamos observar la respuesta, tanto *in vivo* como *in vitro*, de macrófagos humanos (que sintetizan IL-1) frente a *B. burgdorferi*. Cultivamos los dos tipos de células juntas y encontramos que los macrófagos secretaban grandes cantidades de IL-1 en presencia de la espiroqueta. Luego examinamos cortes finos de piel de conejos a los que se les había inyectado

intradérmicamente IL-1, *B. burgdorferi* o LPS. Los tres indujeron una intensa respuesta inflamatoria en la piel; creemos, pues, que tanto las lesiones de la piel como la fiebre encuentran explicación en la liberación de IL-1.

Pensamos también que la IL-1 liberada en respuesta a *Borrelia* es directamente responsable de la artritis que caracteriza el tercer estadio de la enfermedad de Lyme. Cuando se añade IL-1 a un cultivo de células de la sinovia (el recubrimiento interno de las articulaciones humanas, como la rodilla), aquélla estimula la producción de dos compuestos: la enzima colagenasa y una sustancia llamada prostaglandina. Ambas contribuyen a la artritis. La colagenasa lo hace degradando el colágeno, el componente principal del tejido conjuntivo de las articulaciones; tal degradación provoca un modelo de erosión muy parecido al que exhiben los casos graves de artritis de Lyme. La prostaglandina contribuye a la artritis provocando dolor. Nuestros experimentos muestran también que las células sinoviales de los pacientes de la enfermedad de Lyme liberan IL-1 cuando estas células se hallan expuestas a la acción de *Borrelia* o a extractos de LPS de *Borrelia*.

La reacción de Jarisch-Hersheimer experimentada por algunos pacientes resulta coherente con nuestra teoría: el tratamiento con antibióticos mata numerosas espiroquetas a la vez, liberándose a la sangre gran cantidad de LPS, que desencadena la producción de interleucina-1.

Es mucho lo que queda por dilucidar sobre la enfermedad de Lyme. No se dispone aún de programas de control eficaces; el mejor modo de protegerse de ella es tener cuidado en las zonas donde hay garrapatas y estar atento a los primeros signos de peligro de haber contraído la enfermedad. Aunque nuestras investigaciones sobre el papel desempeñado por la IL-1 quizá no contribuyan al control de la enfermedad, creemos que la importancia de nuestros trabajos no se circunscribe a ella. En el examen de la respuesta fisiológica a la infección hemos demostrado que un único agente infeccioso puede desencadenar una reacción en cadena, así como que la producción localizada de un potente mediador biológico, piénsese en la IL-1, puede explicar los cambios inflamatorios característicos de la artritis de Lyme. Esperamos que ello constituya un modelo útil para el estudio de otras enfermedades artríticas de origen desconocido.

Fusión nuclear fría

Las partículas denominadas muones catalizan las reacciones de fusión nuclear, eliminando la necesidad de láseres potentes o de plasmas de alta temperatura. Este proceso puede convertirse algún día en una fuente de energía comercial

Johann Rafelski y Steven E. Jones

La mención de la fusión nuclear suele evocar imágenes de imanes enormes, láseres potentes y plasmas más calientes que el centro del Sol. Todos estos dispositivos promueven las condiciones extremas bajo las que dos átomos de hidrógeno se funden, o unen, para crear helio y liberar energía que puede utilizarse para producir energía eléctrica. La fusión catalizada con muones es un tipo de fusión menos conocido, pero quizá más prometedor, y presenta una propiedad muy importante: no requiere en absoluto temperaturas elevadas.

La fusión catalizada con muones, o fusión fría, puede tener lugar rápidamente y a temperatura ambiente en una cámara sencilla que contenga ciertas clases de hidrógeno conocidas como deuterio y tritio. Las partículas denominadas muones negativos se introducen en dicha cámara y forman enlaces fuertes y peculiares entre los núcleos de algunos de los átomos de hidrógeno. A continuación, los núcleos de hidrógeno enlazados con muones funden y dejan en libertad a los muones, que podrán así catalizar otras reacciones de fusión. Los restantes átomos del gas no se ven afectados por el proceso, excepto en el hecho de que cada fusión incrementa la temperatura del gas en su conjunto. El calor producido por las reacciones catalizadas con muones podría utilizarse algún día para mover turbinas y producir electricidad.

La fusión catalizada con muones no se limita a la temperatura ambiente. El proceso puede tener lugar con hidrógeno líquido o sólido, a temperaturas bajísimas, de 13 grados Kelvin (grados Celsius por encima del cero absoluto), y con hidrógeno gaseoso a temperaturas altas, de 530 grados Celsius. Las investigaciones recientes sugieren que las reacciones en cuestión alcanzarían su máximo rendimiento a unos 900 grados Celsius.

Los protagonistas del proceso, los muones, son partículas elementales de vida corta. En la naturaleza, se encuentran en la radiación cósmica secundaria, que se origina en la interacción entre la radiación cósmica primaria y la atmósfera superior. Los muones se pueden producir artificialmente haciendo que un haz de iones (átomos cargados eléctricamente), procedente de un acelerador de partículas, colisione con una muestra de materia ordinaria, carbono por ejemplo. Estas colisiones producen piones, partículas que se desintegran rápidamente y dan lugar a muones, en un proceso parecido al que tiene lugar cuando la radiación cósmica primaria interacciona con la atmósfera.

Los muones pueden poseer carga eléctrica positiva o negativa. Un muon negativo tiene propiedades bastante similares a las del electrón, pero su masa es 207 veces mayor. Como veremos más adelante, la propiedad que permite catalizar las reacciones de fusión es la gran masa de los muones.

No es todavía posible construir un reactor de fusión fría que produzca más energía que la que se necesita para que dicho reactor funcione. Una de las dificultades más importantes radica en la vida corta de los muones que, por término medio, se desintegran en dos microsegundos (la millonésima parte de un segundo) después de haberse creado. Durante ese tiempo tan corto, cada muon debe ser capaz de catalizar un número suficientemente elevado de reacciones para que el propio reactor suministre energía al acelerador que produce los muones. Hasta hace poco, este objetivo parecía muy remoto. Sin embargo, los avances teóricos y experimentales logrados durante estos últimos años han puesto de manifiesto que, bajo condiciones apropiadas, un muon puede catalizar, antes de desintegrarse, cientos de reacciones más de las que se suponían posibles. Se vislumbra así la posibilidad de que la fusión fría se convierta en un método económicamente viable de producción de energía.

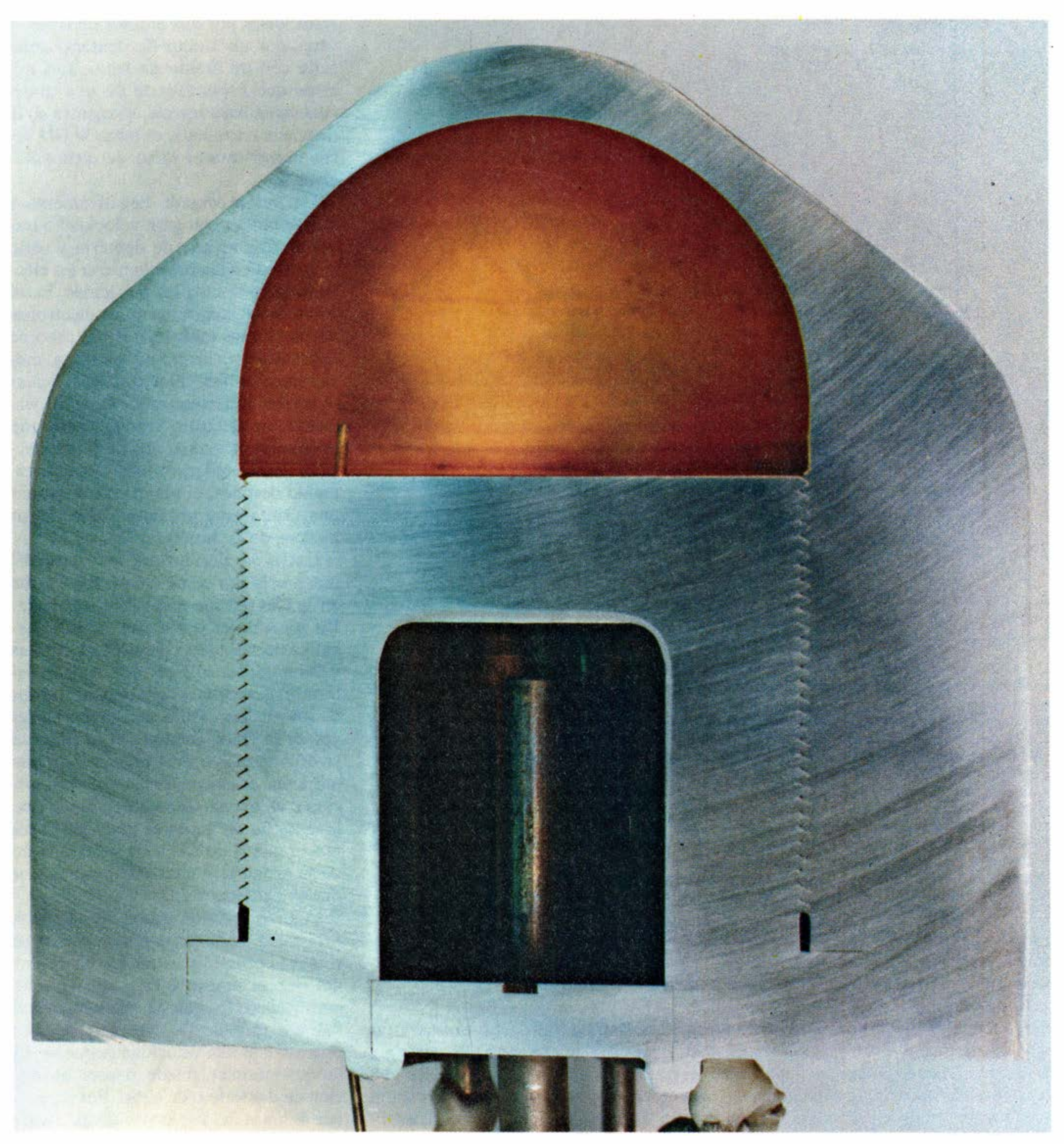
La posibilidad de que los muones negativos sirvan para catalizar el proceso de fusión nuclear fue sugerida teóricamente por F. C. Frank y Andrei D. Sajarov, a finales de los años cuarenta. La primera observación experimental de fusión catalizada con muones tuvo lugar, por azar, una década más tarde. Luis W. Alvarez, junto con sus colaboradores de la Universidad de California en Berkeley, al analizar los resultados de un experimento no relacionado con este tema, observaron ciertas imágenes extrañas sobre las películas que registraban las trazas de partículas en una cámara de burbujas. Los investigadores de Berkeley no conocían las hipótesis de Frank y Sajarov, pero, con la ayuda de Edward Teller, dedujeron que las imágenes citadas correspondían a los productos de reacciones de fusión catalizadas con muones.

Este descubrimiento causó gran sensación en un primer momento. Como afirmó Alvarez en su discurso de recepción del premio Nobel en 1968, "tuvimos una corta, pero estimulante experiencia, cuando pensamos que habíamos resuelto definitivamente todos los problemas de energía de la humanidad". Desgraciadamente, los cálculos posteriores demostraron que las reacciones observadas eran demasiado lentas para producir en la práctica energía: por término medio, un muon sólo tenía tiempo para catalizar, a lo sumo, una fusión antes de desintegrarse y, en consecuencia, la energía suministrada era demasiado pequeña para crear nuevos muones capaces de llevar a cabo las reacciones subsiguientes. La mayoría de los científicos se dedicaron a buscar otros métodos de estimulación de la fusión.

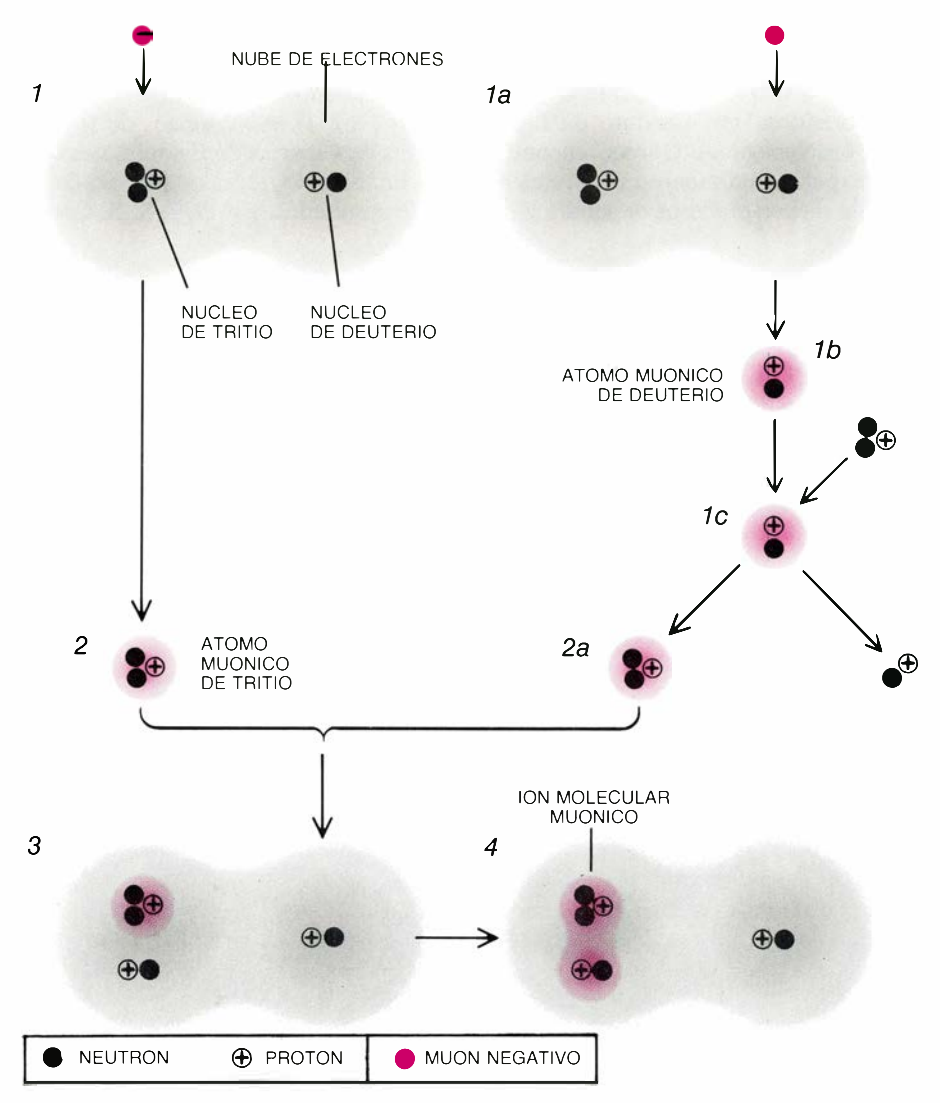
Sin embargo, algunos investigadores continuaron estudiando la fusión cata-

lizada con muones. Descubrieron que éstos catalizaban el proceso de fusión mediante mecanismos diferentes de los observados en un principio. Aunque el grupo de Alvarez había descubierto sólo reacciones con deuterio e hidrógeno ordinario, resultó evidente que los muones podían catalizar, mucho más rápidamente, las reacciones con deuterio y tritio. V. P. Dzelepov y sus colaboradores, del Instituto de Investigación Nuclear de Dubna, encontraron experimentalmente que la velocidad de dichos procesos dependía de la temperatura y que, para altas temperaturas, el número de fusiones por muon aumentaba bastante.

En 1967, E. A. Vesman, de la Academia de Ciencias de Estonia, desarrolló un modelo teórico que explicaba estos resultados. En 1977, S. S. Gersh-



1. CAMARA DE REACCION EXPERIMENTAL donde se llevan a cabo las reacciones de fusión frías. Estas reacciones tienen lugar en el hemisferio dorado del recinto (*parte superior*) cuyo diámetro es de cinco centímetros. Un tubo delgado llena la cámara con deuterio y tritio (formas de hidrógeno). Desde el exterior, llega un haz de muones cargados negativamente hasta el extremo superior de esta cámara, después de atravesar la cubierta de acero inoxidable. Los muones actúan de catalizadores de la reacción y provocan la fusión de los átomos de deuterio y tritio, liberando energía y produciendo helio y neutrones. Los gases licuificados arriban a la cámara a través de un tubo grueso situado en la pieza hueca que está roscada en la base de la cámara de reacción (*parte inferior*). Estos líquidos enfrían además la cámara y permiten estudiar el rendimiento de las reacciones catalizadas con muones al variar la temperatura. Cámaras de reacción similares a ésta, construidas a escala mayor, podrán utilizarse algún día para producir energía en una central de energía de fusión catalizada con muones. La cámara de reacción, cuya sección transversal recoge esta figura, fue desarrollada por Augustine J. Caffrey y Kenneth D. Watts, del Laboratorio Nacional de Ingeniería con sede en Idaho, auxiliado por Michael A. Paciotti y H. Richard Maltrud, ambos del Laboratorio Nacional de Los Alamos.



2. PASOS INICIALES DE UNA FUSION catalizada con muones: son la aproximación de un núcleo de deuterio y otro de tritio hasta distancias extraordinariamente pequeñas. En primer lugar, un muon invade una molécula formada por estos dos núcleos, unidos mediante una nube de electrones. El muon puede colisionar con un núcleo de tritio (*1*). Entonces, como consecuencia mecánico-cuántica de la elevada masa del muon, esta partícula pasa a ocupar una órbita muy próxima al núcleo, formando lo que se conoce por átomo muónico de tritio (*2*). De manera alternativa (*1a*), el muon puede colisionar con un átomo de deuterio, formando un átomo muónico de deuterio (*1b*). En una colisión posterior (*1c*), el muon puede transferirse a un núcleo de tritio y crear un átomo muónico de tritio (*2a*). El átomo muónico de tritio penetra, luego, en la nube de electrones de otra molécula y colisiona con un núcleo de deuterio (*3*). A continuación, el núcleo de tritio, el núcleo de deuterio y el muon se combinan dentro de la molécula para formar un ion molecular muónico, en el que el muon mantiene unidos a los núcleos, de forma análoga a como un electrón une a los núcleos en una molécula ordinaria (*4*). Dada la gran masa del muon, los núcleos del ion molecular muónico distan entre sí unas 200 veces menos que los núcleos en una molécula ordinaria. (Ilustración de G. Retseck.)

tein, L. I. Ponomarev y sus colaboradores de Dubna utilizaron el modelo de Vesman para predecir que, dadas ciertas temperaturas y determinadas mezclas de deuterio y tritio de densidad elevada, la fusión catalizada con muones podría tener lugar mucho antes –tal vez miles de veces más rápidamente– que los procesos observados en un principio. La predicción condujo a uno de los autores (Jones) y a sus colaboradores a llevar a cabo estudios experimentales de fusión catalizada con muones en deuterio y tritio.

¿Qué sucede cuando un haz de muones negativos entra en un recipiente que contiene deuterio y tritio? Para comprender lo que sigue, es necesario, ante todo, entender la diferencia existente entre el deuterio, el tritio y el hidrógeno ordinario.

El núcleo de hidrógeno ordinario es un protón: una partícula pesada y cargada positivamente. El núcleo del deuterio está constituido por un protón y un neutrón; éste tiene una masa ligeramente mayor que la del protón y carece de carga eléctrica. El núcleo de tritio consta de un protón y dos neutrones. En los tres tipos de átomos de hidrógeno, el núcleo está rodeado por un electrón (dotado de carga negativa).

Al igual que sucede en los átomos de hidrógeno ordinario, los átomos de deuterio y tritio se combinan a pares para formar moléculas. En cada molécula, los dos núcleos están unidos por los dos electrones, que forman una especie de "nube" unificadora entre los núcleos cargados positivamente y alrededor de ellos. En una mezcla de deuterio y tritio, algunas de las moléculas están formadas por dos átomos de deuterio, otras por dos átomos de tritio, y otras por un átomo de deuterio enlazado con un átomo de tritio. Los núcleos que forman parte de una molécula están bastante alejados entre sí; la distancia entre ellos es unas 30.000 veces mayor que el radio de dichos núcleos.

Un muon cargado negativamente y que se mueva con gran velocidad a través de una mezcla de deuterio y tritio se frenará en las colisiones con los electrones que unen a las moléculas. Estas colisiones hacen saltar a los electrones de sus órbitas moleculares. Al cabo de poco tiempo, el muon se estará moviendo con una velocidad lo suficientemente baja como para que, al desplazar un electrón, resulte capturado en una órbita similar a la de dicho electrón. Sin embargo, casi inmediatamente después, el muon pasa a ocupar una órbita muy próxima a uno de los núcleos de la molécula.

La razón por la que la órbita del muon está tan cerca del núcleo estriba en la elevada masa de dicha partícula. En general, las partículas cargadas negativamente, tales como los electrones y los muones, sólo pueden ocupar determinadas órbitas estables alrededor de los núcleos. De acuerdo con las leyes de la física atómica, el tamaño de la órbita estable más pequeña de una partícula es aproximadamente proporcional al inverso de su masa. Dado que la masa de un muon es unas 200 veces mayor que la de un electrón, el tamaño de su órbita será unas 200 veces menor que la del electrón.

Cuando el muon ocupa una de estas órbitas, la molécula que ha invadido se rompe; el muon y el núcleo alrededor del que se mueve esta partícula –que constituyen lo que se denomina un "átomo muónico"– emergen de este proceso con una velocidad pequeña. El átomo muónico puede poseer un núcleo de deuterio o de tritio. Por ser mayor la masa del núcleo de tritio, puede enlazar al muon de forma más intensa que el núcleo de deuterio. En consecuencia, los muones que originalmente se han unido a núcleos de deuterio se transfieren a núcleos de tritio a raíz de otra colisión posterior. Los procesos que conducen a la formación de un átomo muónico de tritio –el frenado de los muones, su unión a un núcleo y su

transferencia desde un núcleo de deuterio hasta otro de tritio– pueden producirse en un tiempo inferior a la milésima parte de la vida media del muon.

Los procesos que tienen lugar en esta primera parte de la reacción de fusión catalizada con muones están gobernados por las leyes de la física atómica. Las etapas subsiguientes de esta secuencia vienen reguladas por las leyes de la física molecular.

El átomo muónico de tritio es un objeto de pequeño tamaño y sin carga eléctrica que se mueve libremente en el seno del gas, penetrando con facilidad a través de las nubes electrónicas de las moléculas de dicho gas. Cuando el átomo muónico se aproxima a un núcleo de deuterio de una molécula ordinaria, puede combinarse con dicho núcleo para formar lo que se conoce por ion molecular muónico. En un ion molecular muónico, el muon enlaza ambos núcleos (en este caso, un núcleo de tritio y otro de deuterio) de forma análoga a como los electrones enlazan los núcleos de una molécula ordinaria. Sin embargo, el muon puede unir los dos núcleos en cuestión a distancias mucho menores, merced a su masa, mucho mayor que la del electrón. La distancia entre los núcleos de una molécula muónica suele ser unas 200 veces menor que la distancia entre los núcleos de una molécula ordinaria.

El pequeño ion molecular muónico se aloja en el interior de la electromolécula (es decir, de la molécula ordinaria). Dado que el ion molecular muónico tiene una carga positiva neta (dos protones cargados positivamente y un muon, cargado negativamente), ocupa el lugar de uno de los núcleos dotados de carga positiva de la electromolécula. Entonces, el ion molecular muónico y el deuterio o tritio adicional se enlazan entre sí mediante electrones, de la misma forma en que los dos núcleos que constituyen el ion molecular muónico están unidos por el muon.

La velocidad con que se forman los iones moleculares muónicos es uno de los elementos clave del número de reacciones que puede catalizar cada muon. La naturaleza de la molécula ordinaria que aloja al ion molecular muónico reviste una importancia decisiva para su formación rápida.

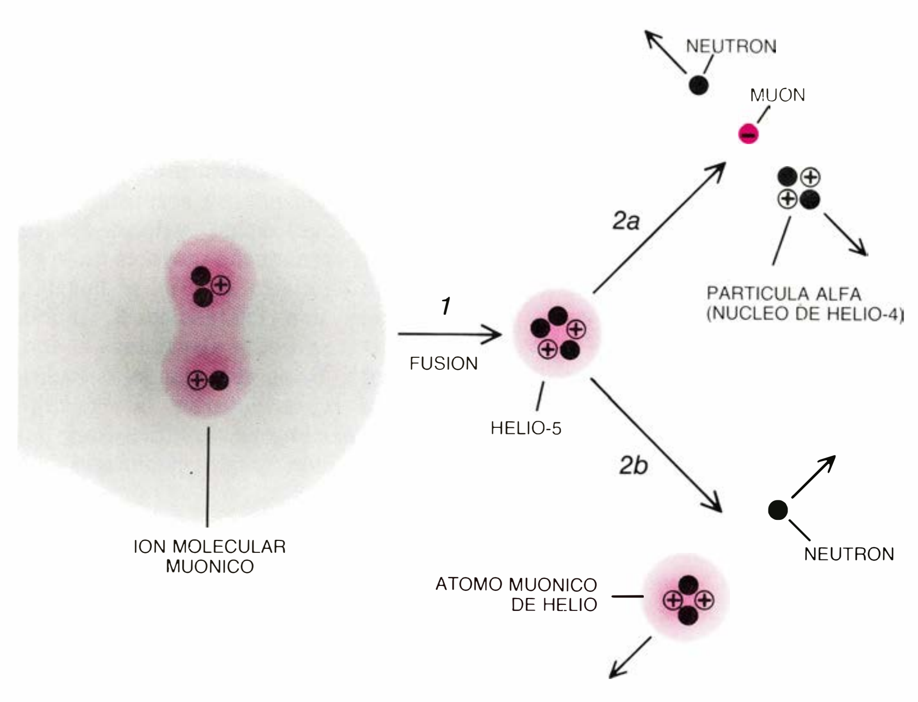
Durante muchos años, se ha creído que la formación de los iones moleculares muónicos era un proceso intrínsecamente lento, por razones relacionadas con la energía de enlace del ion molecular muónico, es decir, con la cantidad de energía que se libera cuando se forma un ion molecular muónico (equivalente a la cantidad de energía necesaria para separar los dos núcleos que constituyen el ion). El ion molecular muónico no puede formarse a menos que exista algún mecanismo capaz de extraer del sistema dicha energía de enlace.

Un electrón podría servir para este propósito. En otras palabras, la energía de enlace podría ser absorbida por un electrón perteneciente a la molécula electrónica de la que forma parte el ion molecular muónico. En tal caso, la molécula emitiría dicho electrón a gran velocidad. Por desgracia, este mecanismo, tan simple, es muy lento. De acuerdo con la mecánica cuántica, el electrón sólo es capaz de absorber una energía tan grande bajo una serie de condiciones restrictivas.

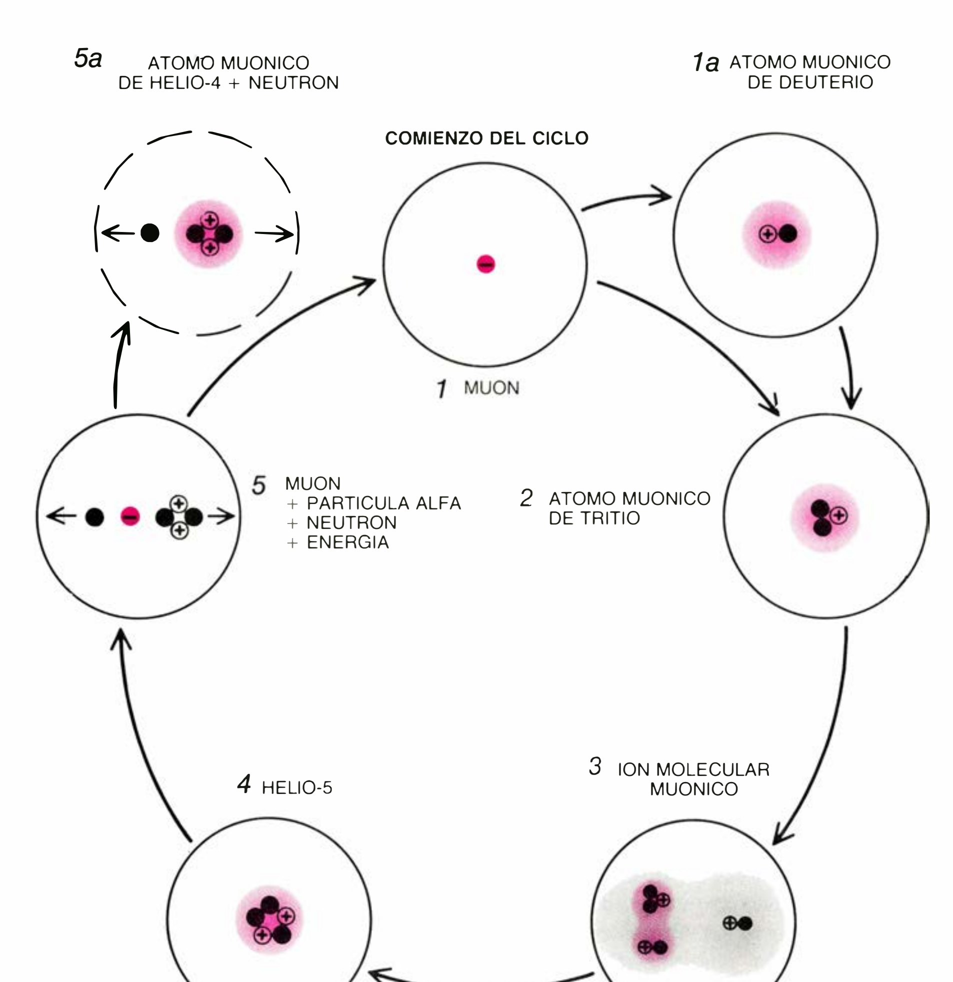
Existe, sin embargo, un mecanismo mucho más rápido. Se trata, en realidad, del mecanismo sugerido por Vesman en 1967. El mecanismo en cuestión depende de un efecto de resonancia. La molécula que aloja al ion molecular muónico puede vibrar en el espacio. Los estados vibracionales de la molécula están cuantizados: sólo se permiten ciertos valores de energía vibracional. En cierto modo, la molécula se comporta como un xilófono, que posee sólo un conjunto dado de tonos. En el mecanismo de Vesman, la energía liberada en la formación del ion molecular muónico "hace sonar" uno de los estados vibracionales de la molécula. La molécula, como un todo, absorbe la energía en cuestión y entra en vibración.

Las energías de enlace de los iones moleculares muónicos suelen ser unas cien veces mayores que las energías de las moléculas ordinarias. Sin embargo, el ion molecular muónico que interviene en el proceso de fusión catalizado con muones no podría formarse por resonancia, a menos que su energía de enlace fuera mucho menor, a fin de poder ajustarse a un nivel de energía de vibración de la molécula mayor. En consecuencia, el ion molecular muónico que se forma por resonancia está ligado muy débilmente: su energía de enlace es muy baja frente a las energías típicas de los iones moleculares muónicos. El descubrimiento de Ponomarev consistió en demostrar, mediante una serie de cálculos detallados, que un estado tan inusual y débilmente ligado como éste podía existir.

El mecanismo de resonancia exige un ajuste muy preciso: la energía absorbida por la molécula debe ser igual a la energía de su estado vibracional. La energía de enlace del ion molecular muónico débilmente ligado será, pues, ligeramente menor que la energía de un estado vibracional de la molécula



3. SE PRODUCE LA FUSION cuando se combinan un núcleo de tritio y otro de deuterio en un ion molecular muónico, formando un núcleo de helio y un neutrón y liberando energía. Dado que los núcleos de tritio y de deuterio de un ion molecular muónico se mantienen muy unidos gracias al muon, la interacción nuclear fuerte puede producir su fusión (*1*), formándose un núcleo de helio 5 orbitado por un muon. El núcleo de helio 5 no tarda en romperse. Este núcleo suele desintegrarse (*2a*) en un neutrón, una partícula alfa (núcleo de helio 4) y un muon. Sin embargo, en algunas ocasiones (*2b*), la partícula alfa cargada positivamente captura el muon dotado de carga negativa y constituye un átomo muónico de helio, impidiendo que el muon catalice otra reacción. La fusión libera energía cinética: el neutrón y la partícula alfa se alejan a gran velocidad.



4. CICLO DE REACCION de una fusión fría; empieza y acaba con un muon libre (*1*). En primer lugar, se forma un átomo muónico de tritio (*2*), en ocasiones, a partir de un átomo muónico de deuterio (*1a*). Este átomo muónico se combina con un núcleo de deuterio para formar un ion molecular muónico (*3*), que se fusiona para engendrar un núcleo de helio 5 (*4*). El helio 5 se desintegra en una partícula alfa y un neutrón, liberando energía (*5*). Si el muon se une a la partícula alfa (*5a*), el ciclo se corta por la sencilla razón de que el agente catalizador ha desaparecido; esta unión es uno de los obstáculos fundamentales para el desarrollo de la fusión catalizada con muones. Si el muon no se une a la partícula alfa, iniciará otro ciclo (*1*).

mayor. El átomo muónico y el núcleo de deuterio pueden proporcionar la energía adicional si poseen la cantidad adecuada de energía cinética cuando colisionan y forman el ion molecular muónico. La energía cinética de las moléculas que colisionan puede ajustarse modificando la temperatura del gas.

De acuerdo con el modelo de resonancia, la temperatura del gas ejerce una gran influencia en la velocidad de formación de los iones moleculares muónicos. En 1982, uno de los autores (Jones) y sus discípulos iniciaron un nuevo programa experimental sobre fusión catalizada con muones en el Laboratorio de Física de Mesones de Los Alamos (LAMPF). Bajo la dirección de Ryszard Gajewski, del Departamento de Energía de los Estados Unidos, se comprobaron las predicciones del modelo de resonancia y se encontró que la velocidad con que se producían las reacciones de fusión catalizadas con muones variaba realmente con la temperatura, en la forma predicha por el modelo. Para nuestra sorpresa, vimos también que dichas velocidades de reacción eran mucho mayores de lo esperado; en cierta ocasión, se llegaban a producir unas 150 fusiones por muon, y todavía se podía elevar más el rendimiento. Estos importantes descubrimientos contribuyeron al resurgimiento del interés científico hacia las reacciones de fusión catalizadas con muones.

Una vez se ha formado el ion molecular muónico, se produce una transición desde un estado débilmente ligado hasta otro estado ligado más fuertemente, liberando la correspondiente energía, que puede escapar mediante la emisión de un electrón. Los núcleos del ion molecular muónico estrechamente ligado se mantienen confinados en un volumen muy pequeño. Uno y otro núcleo se repelen fuertemente entre sí, debido a que ambos están cargados positivamente, pero el muon los mantiene unidos. Andando el tiempo, los núcleos se unen mediante el efecto túnel: un proceso mecánico-cuántico en el que los núcleos atraviesan la "barrera" de su repulsión mutua hasta que la distancia que los separa es tan pequeña que entre ellos actúa la fuerza nuclear (es decir, la interacción fuerte que mantiene unidos a protones y neutrones en los núcleos). En tal caso, los procesos empiezan a estar gobernados por las leyes de la física nuclear, y no por las de la física molecular.

Los núcleos en cuestión se fusionan para formar un solo núcleo de helio 5, constituido por dos protones y tres neutrones. Poco después, este núcleo se rompe en una partícula alfa, es decir, un núcleo de helio ordinario (dos protones y dos neutrones) y un neutrón libre.

En esta reacción se libera cierta cantidad de energía, en forma de energía cinética: la partícula alfa y el neutrón se alejan mutuamente con una velocidad elevada. El muon suele quedar en libertad y, por tanto, se puede repetir el ciclo. De hecho, esta partícula actúa de auténtico catalizador de la fusión nuclear.

Ocurre, sin embargo, en algunas ocasiones, que la partícula alfa creada en el proceso de fusión captura dicho muon negativo, en virtud de su propia carga positiva, y, en consecuencia, impide que el muon catalice una nueva reacción de fusión. Incluso en el caso de que el muon sea capturado, existe todavía cierta probabilidad de que se libere en una colisión, debido a que la partícula alfa se mueve inicialmente con gran velocidad a través del gas denso que llena el recinto de reacción. En 1981, Gershtein y sus colaboradores e, independientemente, Giovanni Fiorentini y Luciano Bracci, de la Universidad de Pisa, descubrieron que un 25 por ciento de los muones que se habían unido a las partículas alfa se liberaban posteriormente en estos procesos. Más recientemente, James S. Cohen, del Laboratorio Nacional de Los Alamos, ha sugerido que este número podía llegar a ser el 40 por ciento. Queda todavía mucho camino por recorrer en el estudio del proceso. Si el muon permanece ligado a una partícula alfa hasta que el sistema queda en reposo, persistirá así hasta que se desintegre.

El hecho de que el muon catalizador permanezca unido a una partícula alfa rompiendo la cadena de reacciones de fusión, constituye el obstáculo principal de la fusión catalizada con muones. Desgraciadamente, el cálculo de la pro-

babilidad de que el sistema se mantenga unido es muy difícil, debido a la complejidad de las reacciones de muchos cuerpos que entran en consideración. En 1957, J. David Jackson, a la sazón en la Universidad de Princeton, descubrió que el muon catalizador podía retirarse con las partículas alfa en un uno por ciento de las reacciones de fusión. En consecuencia, postuló que no se podían producir más de 100 reacciones de fusión por cada muon.

Los resultados de los experimentos llevados a cabo en el LAMPF, en los que se observaron bastante más de 100 fusiones por muon, obligaron a reconsiderar la teoría de la probabilidad de unión de los muones con las partículas alfa, e impulsaron la realización de nuevos ensayos. Los datos obtenidos en los experimentos del LAMPF, tal como los analizó Allen N. Anderson, de la empresa Idaho Research, demostraron que la probabilidad de que se produzca una unión alfa-muon es del orden del 0,4 por ciento, o incluso algo menor, bajo ciertas condiciones (es decir, una cifra inferior a la mitad del valor teórico aceptado durante mucho tiempo). Estos sorprendentes resultados se han confirmado, con posterioridad, en experimentos llevados a cabo en el Instituto Suizo de Investigación Nuclear (SIN), bajo la dirección de Wolfgang H. Breunlich, de la Academia de Ciencias de Austria, y de Jean-Claude Petitjean, del SIN, así como en experimentos realizados en los laboratorios de altas energías del Japón, bajo la dirección de Kanetada Nagamine.

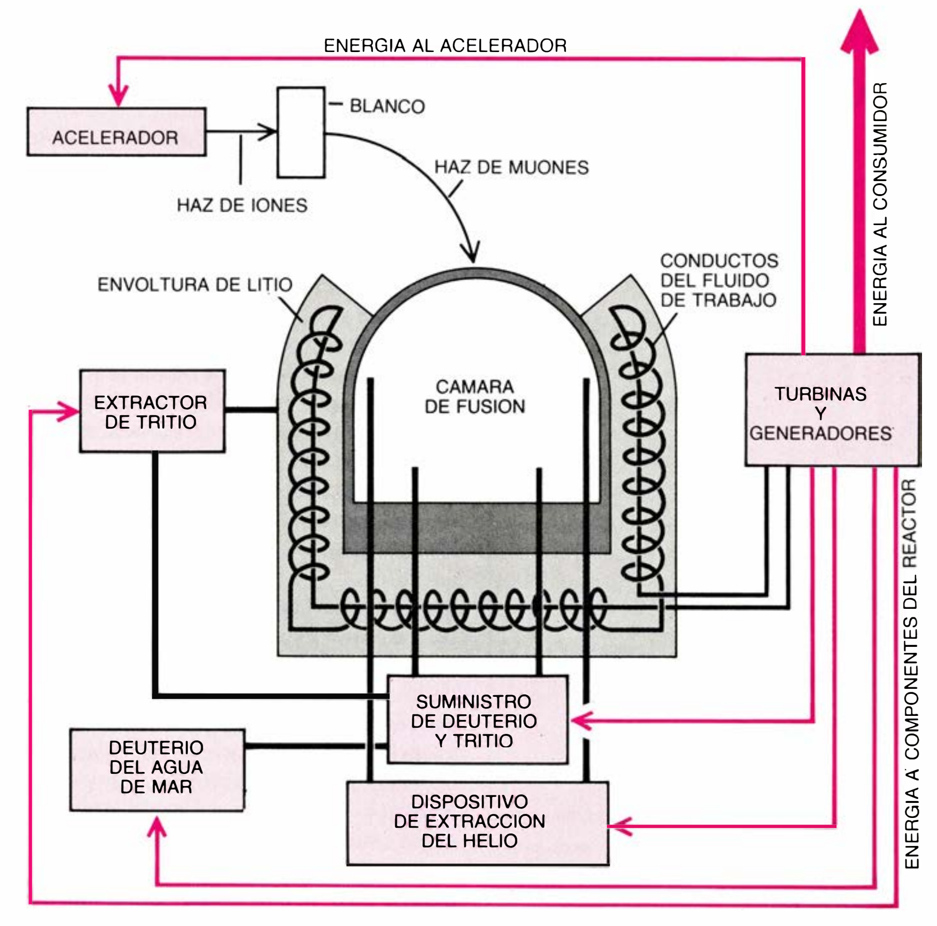
Los reajustes teóricos, debidos, en parte, a David M. Ceperley y a Berni J. Alder, del Laboratorio Nacional Lawrence Livermore, y a Michael Danos, de la Oficina de Pesos y Medidas, a Berndt Müller, de la Universidad de Frankfurt, y a uno de los autores de este artículo (Rafelski), han resuelto en gran medida el desacuerdo existente entre la teoría y los resultados experimentales relacionados con el problema de la unión de muones y partículas alfa. Sin embargo, subsisten todavía algunas cuestiones pendientes. Con el fin de responder a estas cuestiones, se ha iniciado un gran programa de investigación internacional en el Laboratorio Rutherford Appleton, bajo la dirección de Jones y John P. Davis, de la Universidad de Birmingham. Los investigadores de este programa medirán directamente la probabilidad de la unión en cuestión utilizando técnicas tradicionales de física de partículas para registrar todos los productos de las reacciones de fusión.

De forma paralela con el esfuerzo experimental, se ha iniciado un vasto programa teórico bajo la dirección de Hendrick J. Monkhorst y Krzysztof Szalewicz, de la Universidad de Florida, y de Lawrence C. Biedenharn, Jr., de la Universidad de Duke. Los investigadores confían en llegar a entender mejor los complicados fenómenos de resonancia.

¿En qué forma podría utilizarse la fusión catalizada con muones como fuente práctica de energía? Aunque ha habido poco tiempo para evaluar las implicaciones de los descubrimientos más recientes, han empezado ya a surgir ciertas posibilidades. Además del número de fusiones por muon, la eficiencia con que se producen los muones en un principio puede resultar decisiva para la viabilidad de un esquema determinado. La energía equivalente de la masa del muon es aproximadamente igual a la energía producida en seis reacciones de fusión; en otras palabras, una máquina ideal que produjera muones con un cabal rendimiento crearía un muon por cada seis fusiones catalizadas con muones que tuvieran lugar en un recinto separado. Desgraciadamente, la energía necesaria para crear un muon es 20 veces mayor en la práctica. Los avances de los aceleradores de partículas pueden reducir bastante esta cifra.

Magnus Jändel, de la Universidad de Uppsala, y uno de los autores de este artículo (Rafelski) han estudiado el coste de la producción de muones en el CERN, el laboratorio europeo de física de partículas. De acuerdo con su trabajo, podríase crear un muon haciendo incidir un haz de iones sobre una cámara con deuterio y tritio, a un coste energético equivalente a entre 100 y 500 reacciones de fusión. Tal como han demostrado las experiencias del LAMPF, el muon así producido catalizaría un centenar largo de fusiones.

En el año 1980, Yu V. Petrov, del



5. ESTE REACTOR COMERCIAL DE FUSION FRIA podría construirse utilizando los recursos técnicos actuales. Para suministrar los muones requeridos, un acelerador de partículas dirige un haz de iones (átomos cargados eléctricamente) sobre un blanco constituido por deuterio o tritio. El haz de muones resultante se hace llegar hasta una cámara de reacción llena de deuterio (que puede sacarse del agua del mar) y tritio. Allí, los muones catalizan las reacciones de fusión. Un purificador extrae de la cámara el helio producido por las reacciones. Los neutrones generados en las reacciones de fusión colisionan con una envoltura de litio, produciendo tritio y helio. El tritio se hace llegar hasta la cámara de reacción y se extrae el helio. El calor resultante de las reacciones de fusión vaporiza un fluido adecuado que se bombea a través de la envoltura de litio. El vapor pone en funcionamiento un conjunto de turbinas de alta presión que, a su vez, alimentan unos generadores de energía eléctrica. Parte de esta energía eléctrica se utiliza luego para alimentar el acelerador de partículas, las bombas y otros componentes del reactor. El resto se vende a los consumidores.

Instituto de Física Nuclear de Leningrado, propuso una forma de producir energía por fusión catalizada con muones basada en la hipótesis de que no eran posibles más de 100 fusiones por muon. Petrov sugirió un proceso híbrido de fusión catalizada con muones y fisión nuclear. Además de producir vapor para mover directamente turbinas y dinamos, la cámara de fusión podría servir también como fuente de neutrones para producir el combustible necesario para alimentar una central de energía nuclear de fisión.

Marshall N. Rosenbluth, Shalom Eliezer y Toshiki Tajima, a la sazón en la Universidad de Texas en Austin, propusieron un mecanismo similar de fusión-fisión. En ese esquema, los muones para el proceso de fusión se producirían dirigiendo un haz de iones a alta energía hacia la cámara de deuterio y tritio y en la que se desarrollarían las reacciones de fusión. De este modo, los muones no necesitarían su transporte desde un acelerador independiente hasta el recinto de reacción. Al igual que en el esquema de Petrov, la fusión catalizada con muones aportaría neutrones para generar combustible nuclear.

Además de estos modelos, existe también la posibilidad del reactor de fusión puro. Presentaría algunas ventajas sobre los reactores de fisión y los reactores híbridos de fusión-fisión. Por una parte, el "residuo" que inevitablemente se produce en el proceso de fusión es helio, un gas inocuo, en vez de los residuos radiactivos de los reactores de fisión. Por otra, los materiales necesarios para alimentar un reactor de fusión abundan en el agua del mar (que contiene grandes cantidades de deuterio, así como el litio necesario para producir tritio).

El zoo de las partículas elementales es muy extenso. Cabe, pues, imaginar que alguna otra partícula, además de los muones, sea capaz de catalizar el proceso de fusión nuclear. Tal como ha sugerido George Zweig, del Instituto de Tecnología de California, los quarks libres (si se encuentran algún día) podrían catalizar las reacciones de fusión. Sin embargo, el muon se ajusta muy bien a este papel. Cada muon puede catalizar un gran número de reacciones; por dos razones: el mecanismo de resonancia posibilita la formación rápida de iones moleculares muónicos y, en segundo lugar, la probabilidad de que el muon sea liberado tras el proceso de fusión, para catalizar luego otra reacción, es bastante elevada. Sucede también que la temperatura para la cual el mecanismo de resonancia trabaja mejor –unos 900 grados Celsius, de acuerdo con Melvin Leon, del LAMPF– se aproxima a la temperatura en que la eficiencia de muchos sistemas de generación de energía, tales como las turbinas de vapor de alta presión, resulta ser mayor.

Con temperaturas mucho más altas, el mecanismo de resonancia aseguraría que la fusión transcurriera más lentamente: al sumar la energía cinética aumentada del átomo muónico y de la molécula con la energía de enlace del ion molecular muónico, se obtiene un valor mayor que la máxima energía que sería capaz de absorber la molécula grande. Este resultado encierra dos implicaciones importantes. En primer lugar, un reactor de fusión catalizada con muones no sería capaz de generar reacciones descontroladas ni de fundirse. En segundo lugar, la fusión catalizada con muones no serviría para fabricar armas termonucleares.

Nos enseña la historia que la investigación avanzada en física tiende a anticiparse a las aplicaciones beneficiosas para la humanidad en una o dos generaciones. La física de las partículas exóticas está entrando en una fase en la que empiezan a aparecer las primeras aplicaciones; la fusión catalizada con muones es un ejemplo privilegiado.

En el caso de la fusión catalizada con muones, las aplicaciones beneficiosas para la sociedad pueden ayudar al mismo tiempo a impulsar la investigación básica. Por ejemplo, en un reactor de fusión sólo se necesitan los muones negativos, pero en el mecanismo de producción de muones se produce también un gran número de muones positivos que podrían utilizarse en trabajos de investigación pura. La disponibilidad de un gran número de muones positivos podría abrir las puertas a una mejor comprensión del carácter enigmático de estas partículas. En consecuencia, la fusión catalizada con muones podría estimular una estrecha simbiosis entre la investigación fundamental y las aplicaciones tecnológicas avanzadas.

Además de sus posibles aplicaciones prácticas, la investigación en fusión catalizada con muones está relacionada con muchos campos de la física moderna. Los procesos en cuestión dependen de las leyes de la física molecular, atómica, nuclear y de partículas. La investigación en fusión catalizada por muones representa un reto a nuestra capacidad para combinar los principios de todos estos campos y profundizar en nuestro conocimiento de los mismos.

Aerodinámica de la polinización eólica

Muchos vegetales presentan una disposición poco menos que perfecta para capturar el polen transportado por el viento. Las piñas, las inflorescencias y otras estructuras encauzan las corrientes de aire hacia los órganos reproductores

Karl J. Niklas

Las ráfagas de polen que, estacionalmente, irritan los senos nasales de quienes padecen fiebre del heno constituyen un efecto colateral de la estrategia reproductora de innumerables especies vegetales, que arrojan al aire una verdadera lluvia de granos de polen (esporas productoras de espermatozoides). Si todo trascurre según lo previsto, las corrientes de aire los conducirán a otras plantas de la misma especie. El polen que aterriza en los primordios seminales (órganos especializados, productores de ovocélulas), o en las estructuras que los contienen, los fecunda y los capacita su transformación en semillas.

Tradicionalmente, los biólogos han considerado que la dispersión por el viento –el método de polinización más antiguo que ha subsistido hasta el presente– resulta más despilfarradora que las estrategias de otros muchos vegetales, que dependen de los insectos, las aves u otros animales para transportar el polen. De cada mil granos de polen confiados al viento, quizá no llegue más de uno al órgano femenino de la planta destinataria. La mayoría choca con objetos no receptores, como hojas, ramas, postes telefónicos o conductos nasales humanos.

Tal vez la polinización eólica sea más derrochadora que otros métodos, pero, en mi opinión, no lo es tanto como pudiera parecer. Después de todo, si tan ineficaz fuera, no la habrían conservado miles de plantas en el transcurso de la historia evolutiva ni –lo que es más sorprendente– la habrían adoptado en épocas recientes. Muchas gimnospermas (plantas con semilla pero sin flor), entre ellas las coníferas y ciertas palmiformes conocidas como cicadáceas, se polinizan con ayuda del viento. Igual ocurre en algunos miembros del otro importante grupo de plantas con semilla: las angiospermas (plantas con flor), que aparecieron unos 200 millones de años después de las gimnospermas. Las gramíneas, una de las familias más numerosas y con mayor éxito de entre las plantas con flor, se polinizan, en su inmensa mayoría, por medio del viento. Se dispone ahora, además, de pruebas fehacientes de que la captura de polen suele distar mucho de resultar aleatoria. Mis colegas y yo, en la Universidad de Cornell, contando con la colaboración de otros investigadores de la de Arizona y del Fairchild Tropical Garden, de Coral Gables, hemos descubierto que muchas plantas presentan un diseño aerodinámico para filtrar grandes cantidades de polen del aire.

La interpretación de nuestros hallazgos requiere cierto conocimiento de la maquinaria reproductora de las plantas con semilla. En las gimnospermas, los primordios seminales se hallan al descubierto en ramas u hojas modificadas. ("Gimnosperma" significa, literalmente, semilla desnuda.) El polen sólo tiene que aproximarse o aterrizar en la abertura del primordio seminal –el micropilo– para madurar y, a la postre, liberar el espermatozoide que fertilizará una ovocélula. Por el contrario, en las angiospermas, el primordio seminal aparece encerrado en la parte bulbosa de una estructura con forma de redoma: el carpelo. Se lleva a cabo la polinización cuando el grano aterriza en el estigma: el extremo superior del carpelo. El polen emite entonces un tubo largo, al objeto de alcanzar la ovocélula para fecundarla.

En algunas especies de plantas con semilla los sexos están en diferentes pies: los órganos polínicos y los productores de ovocélulas se desarrollan en individuos distintos. Sin embargo, son innúmeras las especies bisexuales; pero aun así, muchas no polinizan sus propias ovocélulas. (Existe una explicación razonable para tan manifiesta ineficacia: la polinización cruzada conserva la diversidad genética.)

Los pinos, bisexuales cuando adultos, recurren a la polinización cruzada para fecundar el 95 por ciento de sus ovocélulas y brindan un magnífico ejemplo de la influencia del diseño aerodinámico de una planta en su capacidad de aprehender polen del aire. Los órganos reproductores masculinos de esas coníferas son pequeños conos que, por lo común, crecen agrupados. Cuando un cono alcanza el desarrollo pleno, las cámaras polínicas se abren y vierten el contenido al aire. Por otro lado, los conos femeninos (piñas) son mayores y pueden crecer aislados. Sus escamas, que presentan en la base unas hojitas que reciben el nombre de brácteas, llevan dos primordios seminales en la cara superior. Cuando la piña está a punto para la polinización, los conjuntos de bráctea y escama se separan un tanto unos de otros, permitiendo que el eólico polen acceda al micropilo.

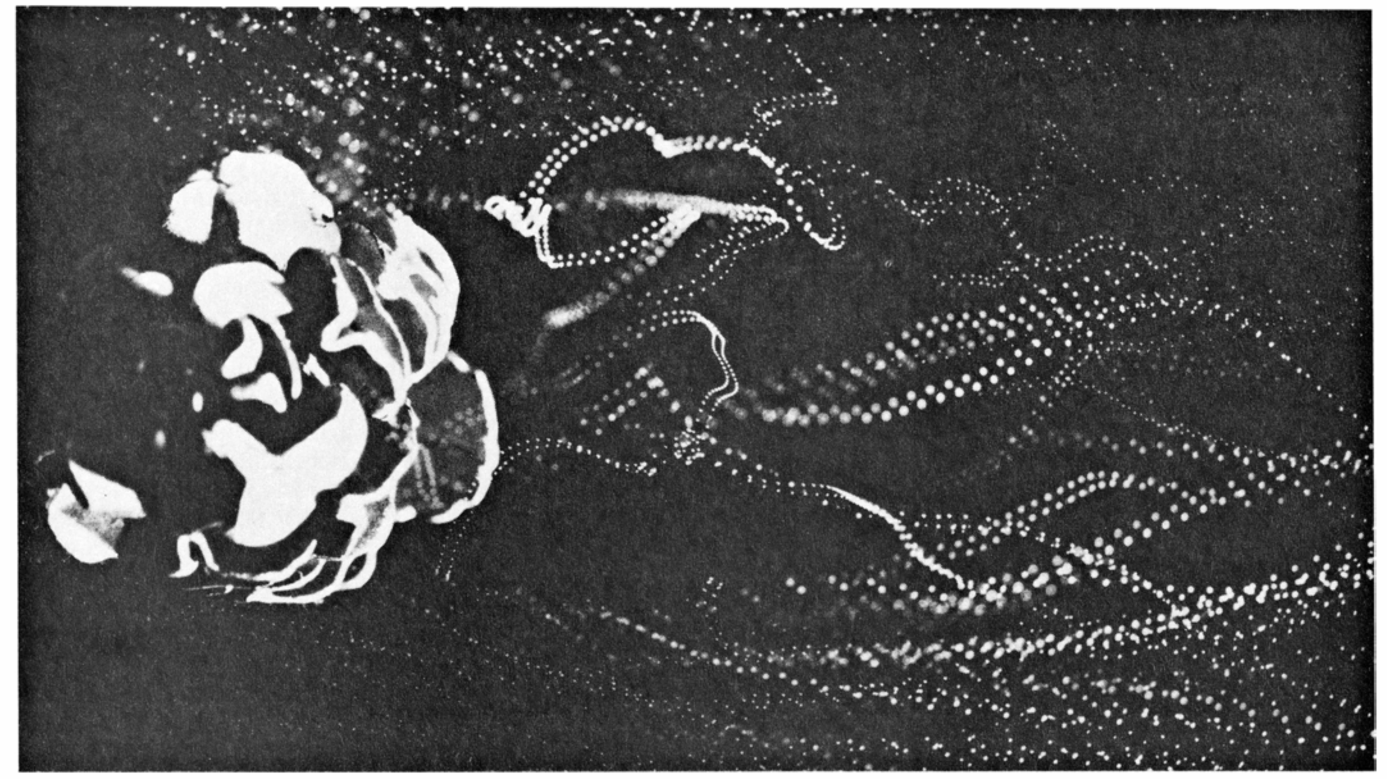
Cuando mis colegas y yo empezamos a estudiar las piñas de pino, nos llamó la atención de modo particular un misterioso rasgo estructural: los primordios seminales se alojan cerca del eje de la piña, y los micropilos se abren hacia dicho eje, no hacia fuera. No parecía un diseño que favoreciera el contacto entre el polen y el micropilo. ¿Acaso, nos preguntábamos, las escamas y las brácteas obstruían la corriente de aire de forma tal que el polen se desviara hacia esos primordios de tan singular ubicación?

Buscamos la respuesta colocando un modelo de piña, de tamaño mayor que el original, en un túnel de viento. Para visualizar las perturbaciones de la co-

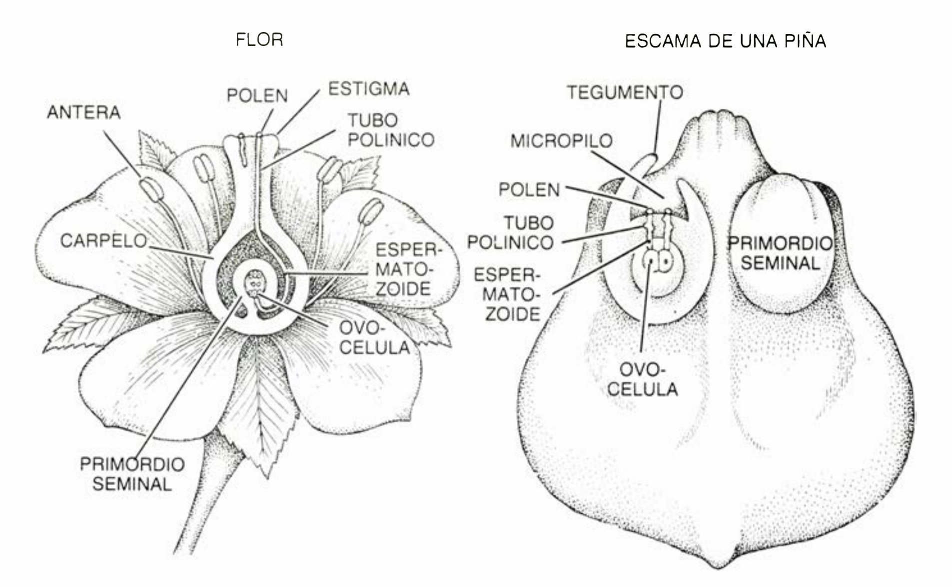
rriente de aire soltábamos en el viento burbujas cargadas de helio, que siguen el flujo del aire con gran precisión y pueden pasar por lugares muy estrechos, a gran velocidad, sin romperse. Acto seguido, registrábamos las trayectorias de las burbujas mediante fotografía estroboscópica: una cámara tomaba instantáneas de las burbujas mientras se disparaba un destello estroboscópico a intervalos prefijados. Un ordenador analizaba las imágenes e informaba sobre la velocidad y la dirección del viento en las "celdas", o minúsculas regiones, del microambiente que rodeaba la piña.

Según indicó el ordenador, el modelo alteraba el movimiento lineal del viento de tres formas básicas [*véase la figura 3*]. En primer lugar, desviaba el aire hacia el núcleo de la piña, que, una

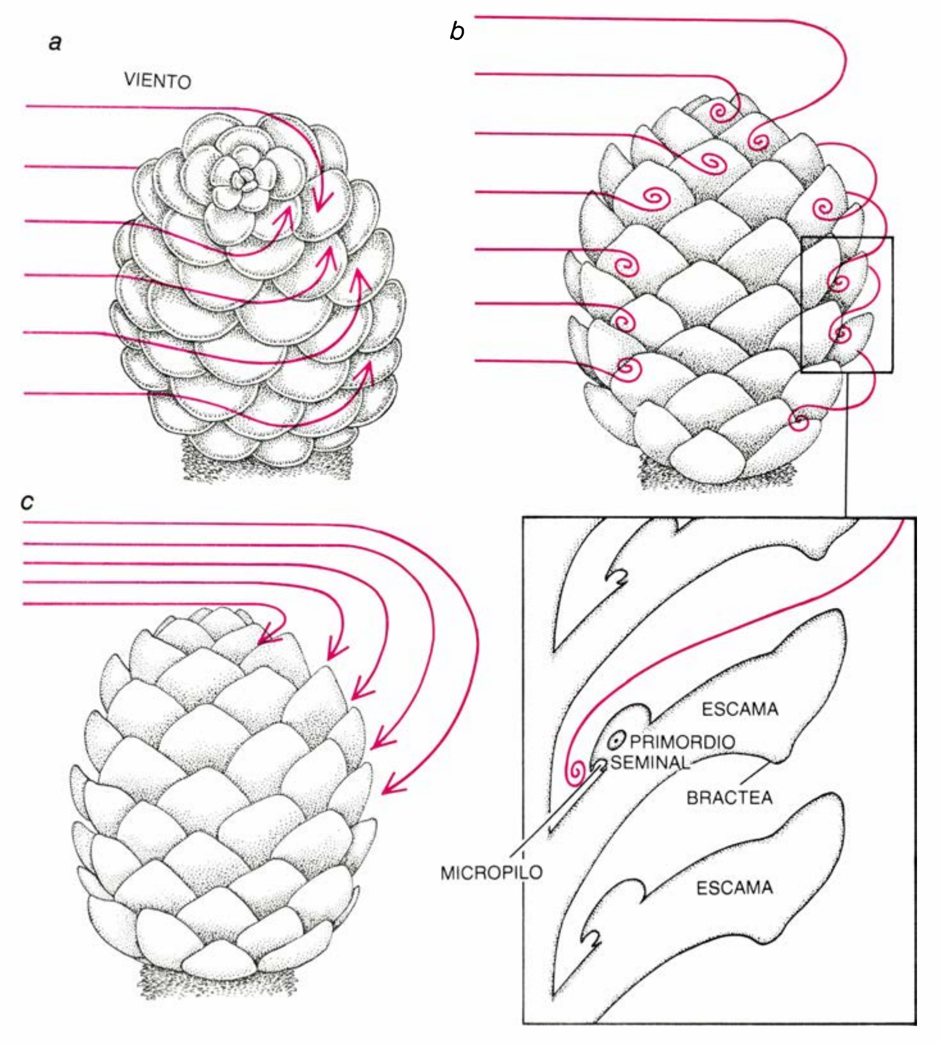




1. EN EL TUNEL DE VIENTO, las burbujas cargadas de helio ponen de relieve la turbulencia creada por un modelo de piña, que aparece visto de lado (*fotografía de arriba*) y en planta (*abajo*). El viento sopla de izquierda a derecha. Dicha turbulencia favorece la colisión entre los granos de polen transportados por el viento y los primordios seminales de la piña (estructuras portadoras de ovocélulas, localizadas en la cara superior de cada escama). La corriente de aire que circunda el modelo se fotografió mediante una técnica estroboscópica que permite iluminar las burbujas a determinados intervalos preestablecidos.



2. TRAS LA POLINIZACION síguese la fecundación de la ovocélula: la captación del polen por parte del estigma de la flor (*izquierda*) o, en una planta sin flores, por parte del micropilo (abertura) de un primordio seminal (*derecha*). Acto seguido, el polen madura, emitiendo, de ser necesario, un tubo para alcanzar la ovocélula. En última instancia, el polen libera espermatozoides que fecundan la ovocélula e instan al primordio seminal a desarrollarse en semilla. Cada escama de la piña lleva dos primordios, cada uno de los cuales alberga dos o tres ovocélulas; pero sólo de ellas una se fecundará y, por tanto, convertirá en embrión. (El primordio de la izquierda se ha girado unos 90 grados para mostrarnos su estructura interna.)



3. TRES PAUTAS aerodinámicas genera a su alrededor una piña a punto de ser polinizada. El viento se desvía hacia el corazón de la piña (*a*), donde gira en torno al eje, barriendo la cara superior de las escamas. Además, el aire se arremolina encima de cada escama (*b*), en las cercanías del micropilo (*recuadro inferior*). En el costado de sotavento de la piña, el aire se desvía hacia abajo y va a dar contra las escamas (*c*).

vez allí, circulaba alrededor del eje, barriendo la cara superior (portadora de los primordios seminales) del conjunto escama-bráctea. En segundo lugar, el viento que pasaba sobre la escama amainaba hacia la base y se arremolinaba caóticamente en la vecindad del micropilo. En tercer lugar, la piña entera, dotada de numerosas protuberancias, producía una importante turbulencia en el costado de sotavento. En ese flanco, el viento se succionaba en sentido descendente y hacia atrás (hacia el lado de donde procedía), topando con las escamas de sotavento.

Las tres pautas indicaban que los granos de polen suspendidos en el viento rozarían el cono real con una gran probabilidad de chocar contra el micropilo. Otros experimentos con piñas auténticas y polen han confirmado esa hipótesis; se evidenciaron las mismas pautas básicas de turbulencia y el polen que circulaba en torno a las piñas seguía, aproximadamente, la trayectoria del viento. Confirmamos, asimismo, que una importante fracción de las esporas precipitábase en los micropilos encarados hacia dentro.

Conocedores de que los órganos femeninos de las coníferas podían desviar, hacia los primodios seminales, el polen transportado por el viento, afrontamos otra cuestión: ¿qué impide que los granos de polen de una especie se "malgasten" en los primodios seminales de otra? En las plantas, como en los animales, el espermatozoide sólo puede fecundar, por lo general, óvulos de su misma especie.

Nuestras investigaciones revelan que la forma específica de la piña producida por cada pino se traduce en una serie de modificaciones idiosincráticas de los patrones del flujo de aire antes descritos. Las pautas características están condicionadas por el diámetro y la longitud de la piña, el número de escamas sujetas al eje central, la forma de aquéllas, el ángulo de sujeción de la escama al eje y la velocidad del viento, entre otros factores. Análogamente, cada clase de polen tiene un tamaño, una forma y una densidad específicos, por lo que interactúa a su manera con la turbulencia. Por ejemplo, los granos de polen de una especie pueden resultar demasiado densos para seguir exactamente las corrientes generadas por una piña de otra especie; en el costado de sotavento, las partículas pueden abandonar las corrientes de aire e ir a parar al suelo, antes de que éstas tiren de ellas hacia las escamas.

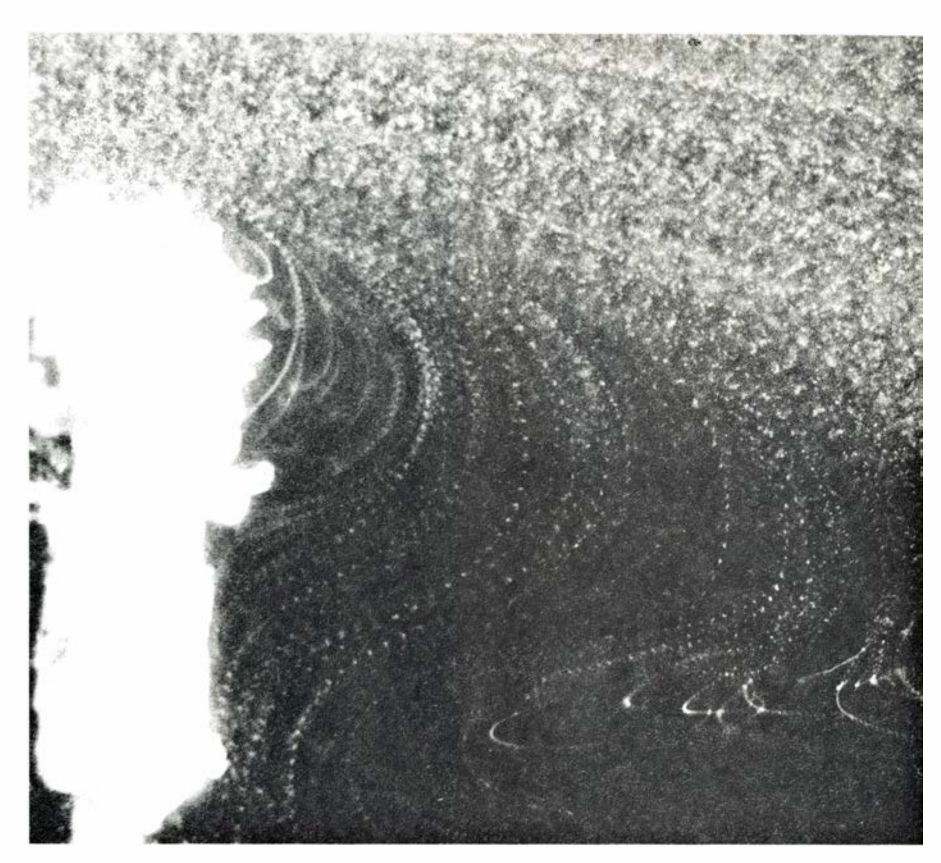
Al parecer, cada variedad de piña genera las pautas de flujo que mejor convienen al polen de su propia especie; la mayoría de las piñas estudiadas por nosotros filtraban su "propio" polen, pero no el de otras especies. Tal capacidad de filtración ofrece ventajas manifiestas. Además de capturar el polen apropiado, las piñas desvían partículas indeseables, como las esporas fúngicas, que podrían dañar los primordios seminales.

La piña no es la única parte de la conífera que influye sobre sobre la polinización; intervienen los grupos de hojas que suelen rodearla. Esas hojas actúan a modo de vallas paranieves: vallas de tablillas que protegen las carreteras de la nieve arrastrada por el viento. Los espacios que separan las tablillas crean remolinos que frenan el viento y, por consiguiente, los copos que arrastra. De resultas, los copos precipitan en el suelo, por el costado de sotavento de la valla, sin alcanzar la carretera. De forma análoga, las hojas que rodean la piña amortiguan la velocidad del aire y la rocían con granos de polen que, acto seguido, serán aspirados en remolino hacia las escamas, pasando por encima y en torno de ellas. Al disponerse simétricamente alrededor del cono, las hojas atrapan partículas eólicas procedentes de cualquier dirección.

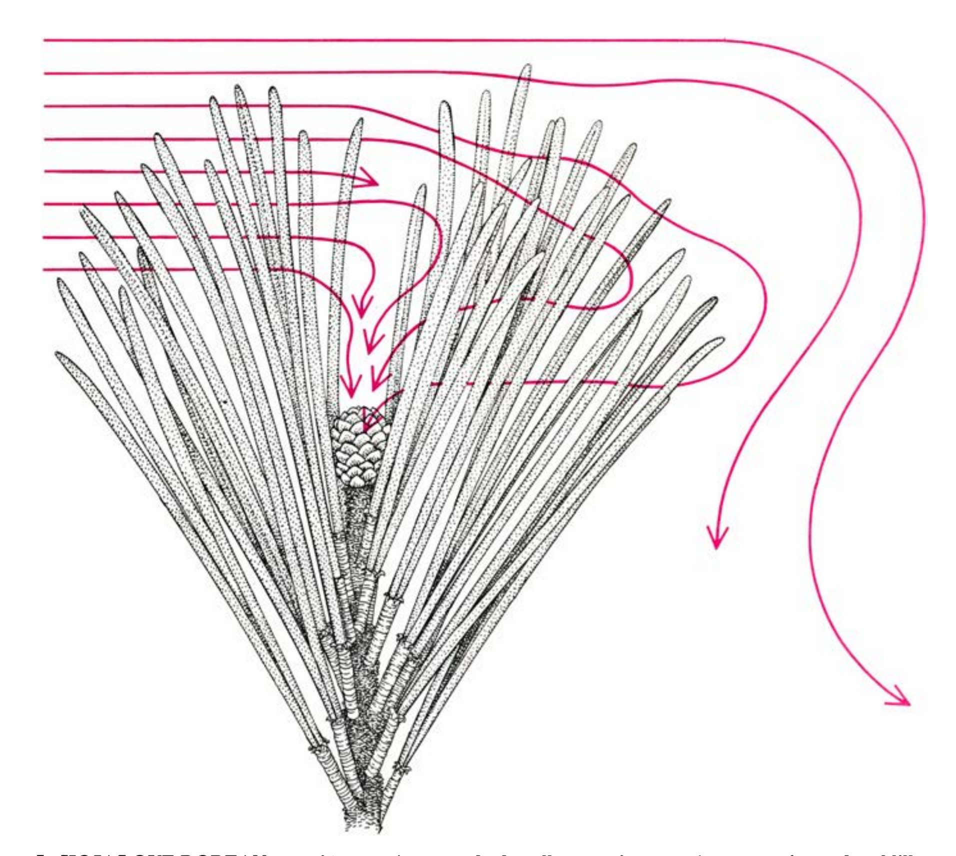
Otra característica de los pinos viene a facilitar también la captura de polen. Los órganos productores de ovocélulas suelen desarrollarse en los extremos de las ramas. Al soplar el viento, las ramas ondulan siguiendo una trayectoria casi circular, lo que permite a las piñas recolectar esporas a diversas alturas.

Al igual que las piñas de los pinos, los órganos reproductores de las gramíneas generan también pautas de turbulencia específicas. Algunas inflorescencias (grupos de flores) de gramíneas brotan en lo alto de tallos flexibles y constan de numerosas flores, dispuestas en torno a un eje central, a semejanza de las escamas que rodean la piña. No es de extrañar que el flujo de aire en la vecindad de esas "apretadas" inflorescencias semeje el que se produce en la periferia de una piña. Las superficies florales desvían el polen hacia los espacios que quedan entre las flores y la inflorescencia entera crea un sumidero aerodinámico de polen en el costado de sotavento. Cuando el tallo se mece bajo la brisa, las flores se encaran hacia el sumidero, incrementándose la captación de polen.

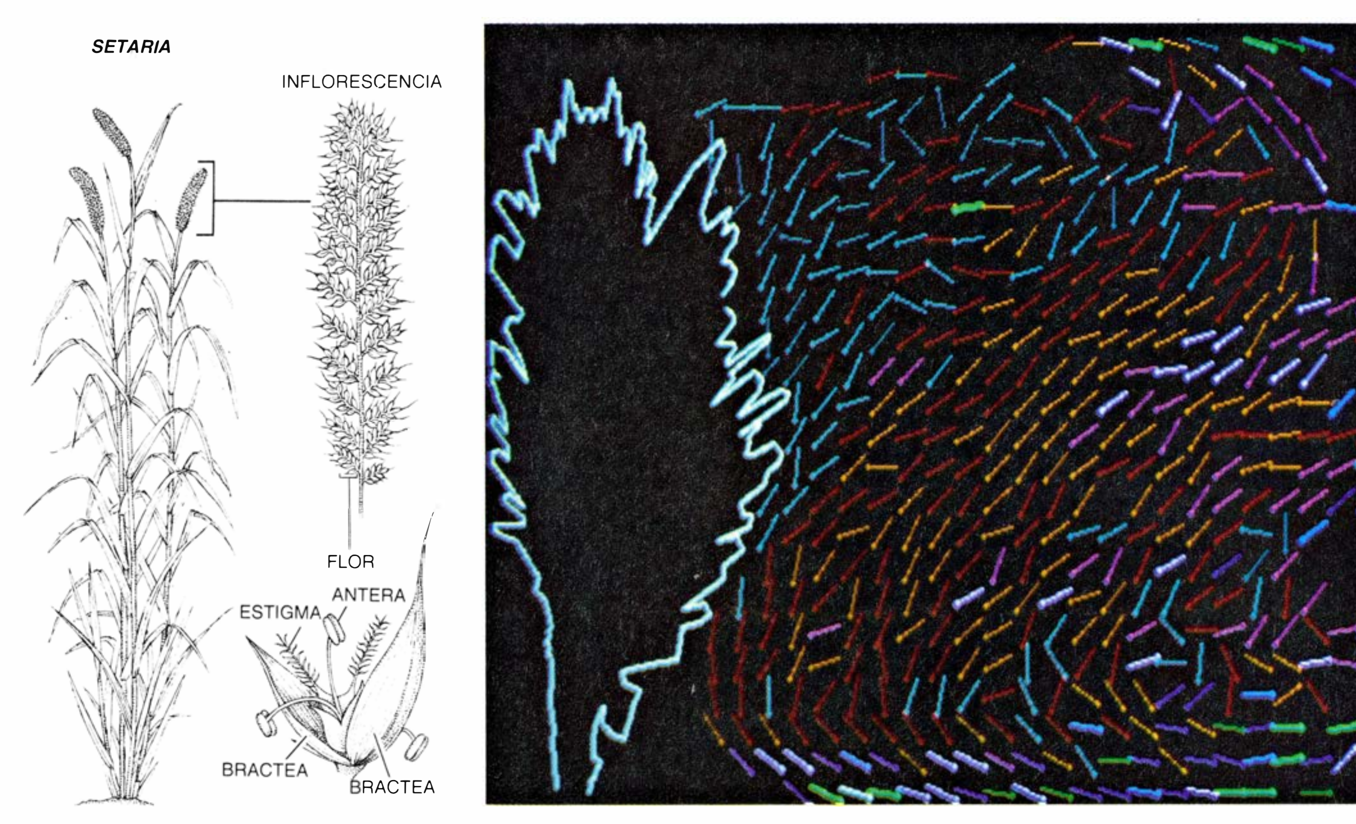
Las inflorescencias de ciertas gramí-



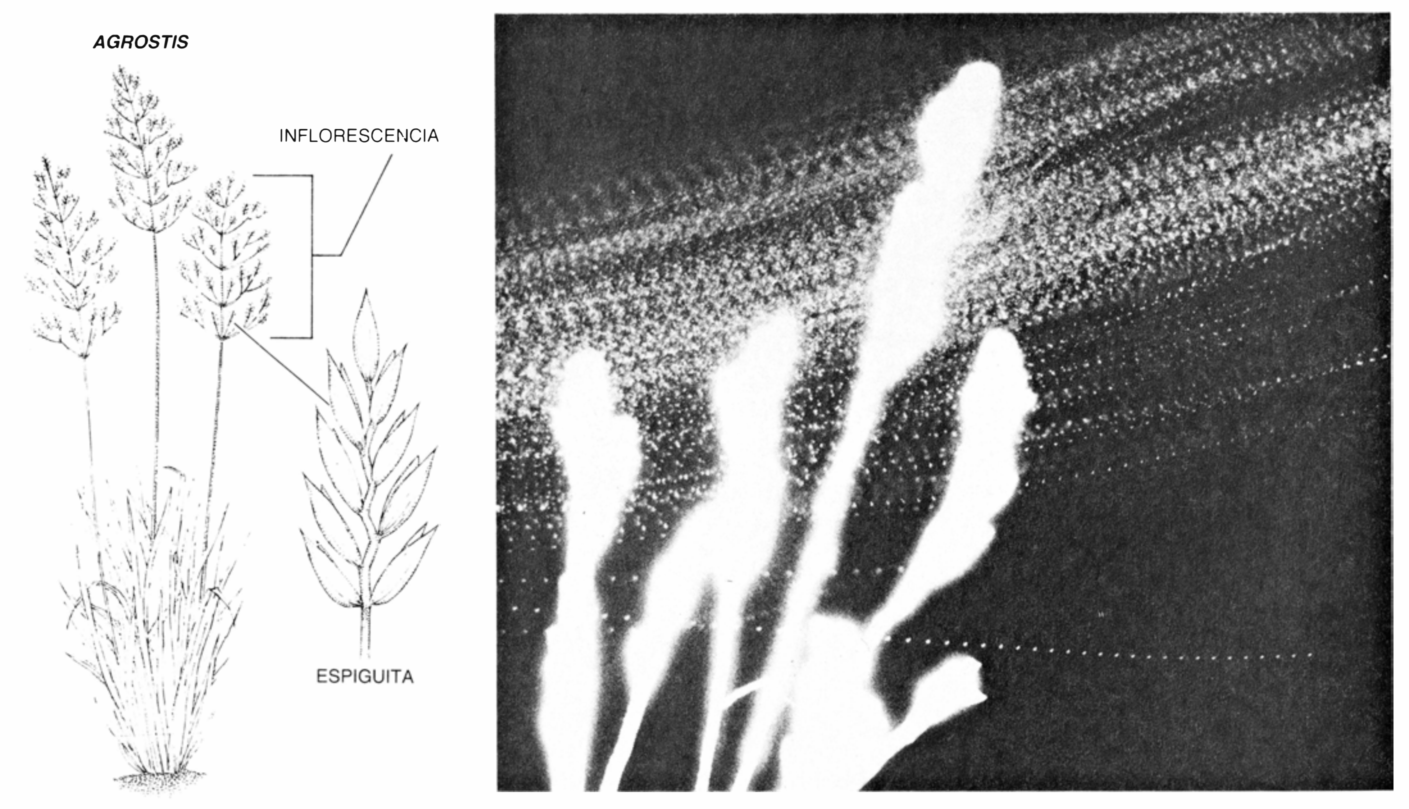
4. FOTOGRAFIA ESTROBOSCOPICA que muestra el polen eólico al cruzarse con una piña de *Pinus taeda*. La corriente de aire circula de izquierda a derecha. Muchos granos dan contra el costado de barlovento o pasan de largo, pero otros se precipitan hacia atrás y colisionan con las escamas de sotavento.



5. HOJAS QUE RODEAN una piña y actúan a modo de valla paranieves; es ésta un conjunto de tablillas dispuestas paralelamente a cierta distancia de la carretera para mantenerla limpia de nieve. Los espacios que quedan entre las tablillas perturban la corriente de aire, haciendo que los copos se precipiten en el suelo justamente en el flanco de sotavento de la valla. De forma análoga, las hojas dispuestas a barlovento de la piña hacen que el polen transportado por el viento caiga en el costado de sotavento y rocíe la piña de esporas.



6. INFLORESCENCIA, o grupo de flores, de *Setaria geniculata*, una especie de mijo (*izquierda*), que produce, a sotavento, una turbulencia similar a la de la piña. El análisis por ordenador (*derecha*) revela que los granos de polen arrastrados por el viento siguen una trayectoria en forma de Z y pierden velocidad al derivar de vuelta hacia la inflorescencia. El ordenador determinó las trayectorias, calculando la dirección media (*flechas de punta redonda*) y la velocidad (*colores*) de los granos de polen contenidos en las celdas de un retículo imaginario, superpuesto sobre el aire que rodeaba la inflorescencia. Se representa en verde la mayor velocidad, seguido, en orden decreciente, de azul oscuro, blanco, púrpura, amarillo, rojo y azul claro. El polen turbulento, que se mueve despacio, constituye un almacén donde puede sumergirse la inflorescencia cuando la mece la brisa. (Figura de P. J. Wynne, izquierda, y el autor, derecha.)



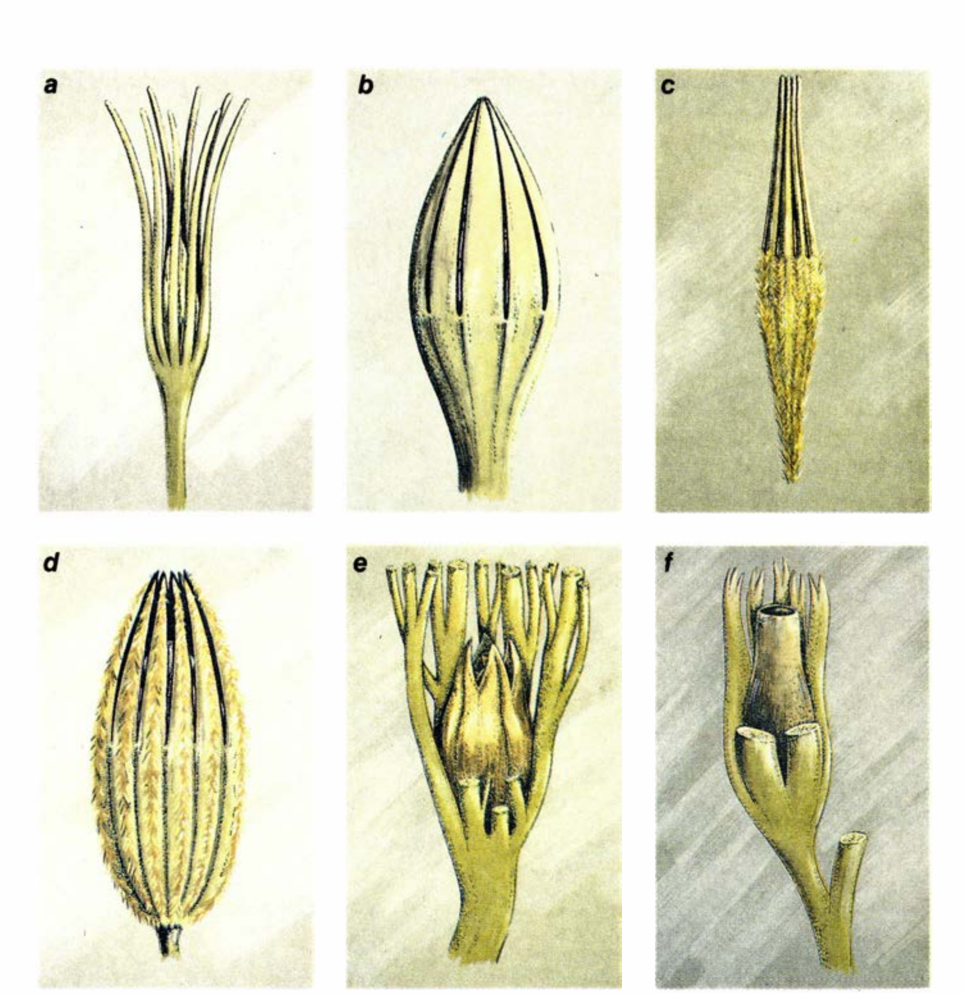
7. *AGROSTIS HIEMALIS* (*izquierda*) produce inflorescencias laxas: un tallo principal que se ramifica en varios menores, que llevan las flores en el extremo. El polen que atraviesa esa inflorescencia (*derecha*) no queda entrampado en la turbulencia, como cuando pasa por un grupo de flores compacto. Las inflorescencias laxas tienen una ventaja aerodinámica: cuando sopla el viento, sus elementos siguen trayectorias complejas que les permiten capturar polen disperso.

neas no forman densos agregados de flores: constan de un pedúnculo principal que sostiene otros más pequeños, cada uno de los cuales porta una o varias flores en el extremo. Tales inflorescencias "laxas" crean poca turbulencia local, pero lo compensan en parte barriendo una amplia zona cuando las agita el viento. A medida que el pedúnculo principal entra en movimiento armónico, los secundarios describen la misma trayectoria y oscilan cada uno por su cuenta, lo que origina un movimiento muy complejo que facilita a las flores la interceptación de gran cantidad de polen de su vecindad.

Los estudios considerados hasta aquí son de carácter fundamentalmente descriptivo, pero a partir de las investigaciones sobre la física de la polinización han empezado ya a esbozarse ciertas predicciones. Los modelos de ordenador permiten estimar la probabilidad de que un determinado órgano productor de ovocélulas atrape granos de polen dotados de una estructura particular. Uno de los objetivos de esos modelos es establecer si la espora producida por una planta dada resulta aerodinámicamente óptima. Aunque el órgano productor de ovocélulas recoja el polen de su propia especie con preferencia al de otras, subsiste la posibilidad de que la planta incremente la tasa de polinización si su grano presenta rasgos algo diferentes.

Igual que en los estudios descriptivos, introducíamos una piña o una inflorescencia en el túnel de viento y determinábamos las pautas específicas del flujo de aire. Seguidamente definíamos el tamaño, la forma y la densidad de un grano de polen hipotético. A partir de las trayectorias del aire y de los principios básicos de la aerodinámica, el ordenador estimaba el número probable de esporas que alcanzarían un primordio seminal (o un estigma).

Hemos analizado unas 20 especies polinizadas por el viento. En su mayoría han desarrollado un tipo de polen que se adapta perfectamente al entorno aerodinámico de la inflorescencia o la piña correspondiente. No obstante, algunas producen granos de polen cuyas propiedades físicas parecen distar del óptimo. En determinados casos, las plantas no fían exclusivamente en el viento para dispersar el polen: las hay que también son polinizadas por insectos, o que se reproducen mediante propágulos vegetativos. Por lo visto, esas plantas sobreviven con un ajuste "chapucero" entre el diseño aerodinámico y la estructura del polen, porque se valen de alternativas reproductoras.



8. PRIMORDIOS SEMINALES FOSILES; a medida que evolucionaron adquirieron mayor eficacia aerodinámica. Algunas de las variantes más antiguas (*a-d*), de hace más de 300 millones de años, constaban de una cámara ovocelular interna, apenas visible, rodeada de un haz, o anillo, de ramas. La turbulencia creada por esos salientes no se centraba en el extremo abierto de la cámara y, por consiguiente, no servía para llevar el polen hasta la ovocélula. En los primordios posteriores (*e, f*), dispuestos en el interior de un conjunto de ramas distinto (la cúpula), el haz parece haberse fusionado y acortado. En el borde de este nuevo diseño, un remolino creaba un sumidero para el polen transportado por el viento. Los primordios modernos se asemejan a la parte interna de la figura *f*; la cámara ovocelular está revestida de un tejido conocido como tegumento.

El que las plantas sin opciones alternativas tiendan a presentar sistemas de polinización eólica muy eficaces induce a pensar que el diseño aerodinámico debe constituir una adaptación evolutiva a la necesidad de capturar polen. Cabe la posibilidad, sin embargo, de que la arquitectura de las plantas sea un mero subproducto afortunado de adaptaciones a otras exigencias del medio ambiente. Por ejemplo, el apretado agrupamiento de los primordios seminales en una piña o en una inflorescencia de gramíneas podría resultar meramente de la presión selectiva en favor de empaquetar numerosas unidades reproductoras en un volumen pequeño. En la misma línea, la disposición de las escamas y las flores podría ser fruto de varias presiones selectivas, coincidentes todas ellas en una misma solución de diseño.

El tema es de muy difícil solución, pero los análisis de plantas fósiles llevados a cabo por el autor y sus colegas apoyan la idea de que la necesidad de captar el polen del aire podría haber influido en la morfología de las especies de polinización eólica. En concreto, valorábamos la capacidad del primordio seminal fósil —a menudo la única parte de la planta que se ha conservado— para capturar polen.

Las primeras plantas con primordios seminales aparecieron hace unos 350 millones de años. Nadie conoce con seguridad cuál era su método de polinización, si bien todo apunta a que debía depender del viento. Trabajando bajo este supuesto, mi grupo preparó modelos de tamaño real de los primordios fósiles, se colocaron en el túnel de viento y se liberaron diversos tipos de polen a su alrededor. Se llegó a una conclusión muy simple: de las muchas formas de primordios seminales habi-

das en la historia de las plantas con semilla, las que exhibían mayor eficacia a la hora de atrapar el polen del viento eran las más similares a las formas de los primordios modernos. La naturaleza parece haber descartado las estructuras menos eficaces.

Uno de esos primordios poco eficaces (o mejor dicho, precursor de primordio) consistía en una corta cámara ovular central, rodeada de un entramado, o anillo, de protuberancias a modo de ramas; los granos de polen alcanzaban la ovocélula al caer en un orificio abierto en lo alto de la cámara. En nuestras investigaciones, las protuberancias actuaban de valla paranieve y amortiguaban la corriente de aire, pero creaban poca turbulencia sobre el orificio, por lo que gran parte del polen caía fuera de la cámara central, eludiendo la entrada principal. Por el contrario, las cámaras ovulares de los primordios seminales modernos no están revestidas por ramas, sino por una lámina continua de tejido: el tegumento, que se abre sólo en el borde (el micropilo). En muchas plantas con primordios seminales desnudos, el aire que choca con el tegumento se canaliza hacia el micropilo y hacia un remolino sito encima de él. Tal turbulencia constituye una reserva de granos de polen, muchos de los cuales precipitan sobre el primordio seminal.

El registro fósil sugiere que el tegumento es una forma reducida y fusionada de las protuberancias; nuestros hallazgos indican que la necesidad de mejorar la captura de polen influyó en tal cambio. Bien pudiera ser que las plantas con primordios seminales muy aerodinámicos se hubieran visto favorecidas por la selección natural, al tener una probabilidad muy superior de ser polinizadas con éxito y, por consiguiente, de rendir una elevada proporción de valiosas semillas.

Fueran cuales fuesen las fuerzas selectivas responsables, resulta evidente que muchas plantas de polinización eólica dejan lo menos posible al azar. Hace tiempo que los botánicos saben que algunas especies exudan gotitas pegajosas o despliegan excrecencias tentaculiformes para atrapar el polen. Además, la mayoría de las plantas polinizadas por el viento presentan distribuciones de contagio, o arracimadas, lo cual limita la distancia a que ha de viajar el polen. Mis colegas y yo hemos descubierto que ciertas plantas recurren, asimismo, a una estrategia complementaria: encauzan las corrientes de aire locales y aprovechan el viento para la reproducción.

Arcos y bóvedas del Próximo Oriente

Trabajando con ladrillos de barro secados al sol (adobes) y con mortero de barro, los albañiles de Egipto, Mesopotamia y Levante construyeron, en la antigüedad, arcos y bóvedas tan elegantes cuan permanentes en su duración

Gus W. Vas Beek

Entre los estudiosos de la historia de la arquitectura se ha convertido casi en un tópico la afirmación según la cual el uso del arco y la bóveda empezó con los romanos. Si bien es cierto que éstos desarrollaron al máximo dichas estructuras, construyéndolas con frecuencia y también a escala monumental –tal como vemos en sus puentes y acueductos, arcos triunfales y anfiteatros que se conservan diseminados por el sur de Europa–, no fueron los romanos los inventores del arco, ni tampoco fueron los primeros en fusionarlos con bóvedas. Cuando se levantó el Coliseo, hacía ya 3000 años que se construía dicho tipo de arcos.

Los pocos arqueólogos que han estudiado este tema coinciden en afirmar que arcos y bóvedas tuvieron su origen en las marismas del bajo Egipto o en Mesopotamia. El prototipo de éstos lo constituía una serie de haces de juncos colocados verticalmente en el suelo, doblados hacia dentro y unidos por su extremo superior, formando, así, un techo. Los dibujos egipcios primitivos nos muestran, al igual que los jeroglíficos que aparecen en ellos, bóvedas de juncos sobre los santuarios, las cámaras de los barcos y otras estructuras. A pesar de que estas antiguas construcciones de caña no se han conservado, dicha técnica se aplica hoy en día en el sur de Iraq, en la confluencia del Tigris y el Eufrates, donde un pueblo llamado los Arabes del Pantano aún construye enormes edificios de juncos abovedados.

La superficie exterior de algunas de estas construcciones se recubre de una capa de barro. Ese revestimiento de zarzo, así se llama, constituye probablemente un resto de una etapa intermedia en la construcción de la bóveda. Mas, dada la escasez de juncos (que tan sólo crecían en las zonas pantanosas), y su poca durabilidad, la mayoría de los albañiles del Próximo Oriente acabaron por prescindir de dicha materia y pasaron a utilizar un material más compacto y resistente: el adobe.

Casi todos los arcos que se conservan en el Próximo Oriente están construidos con adobes (palabra tomada del árabe *al-túb*). Incluso tras la aparición del ladrillo continuaron utilizándose los adobes en la mayoría de los edificios del Próximo Oriente.

El porqué de dicha preferencia es de fácil explicación, ya que el adobe está formado por ingredientes tan comunes como tierra, agua y paja machacada, elementos a los que a veces se añadía estiércol o arena. Por otro lado, el adobe no precisaba cocerse en un horno, ya que bastaba con secarlo al sol. Ambos factores definen al adobe como el material de construcción más económico: requería un mayor esfuerzo, pero una energía menor. El adobe es un mal conductor del calor y es, por tanto, el material de construcción idóneo para regiones áridas donde los cambios de temperatura son elevados, llegando en un día de verano a alcanzar los 32 grados C, mientras que en el interior de una casa de adobe la temperatura se mantiene a unos 21 grados C. A la misma temperatura externa una casa prefabricada de hormigón, sin aire acondicionado, puede alcanzar los 37 grados C.

El mismo clima árido que hace del adobe el material idóneo para la construcción en el Próximo Oriente define a la bóveda como la técnica perfecta para la construcción de techumbres, puesto que un techo abovedado permite que el aire caliente ascienda más que un techo bajo y plano, todo lo cual proporciona una atmósfera aún más fresca. Un factor predominante para la elección de techos abovedados es la inexistencia de bosques en muchas regiones del Próximo Oriente, que aportaran la madera destinada a apuntalar techos planos. Una bóveda de adobe no necesita ser apuntalada por vigas de madera, por lo que no tan sólo resulta práctica y económica, sino que también representa una forma grácil de techar un edificio.

Se han encontrado tres clases de arcos y bóvedas de adobe en excavaciones del Próximo Oriente. La primera es el arco radial, el que resulta probablemente más familiar por cuanto a su modernidad se refiere [*véase la figura 2*]. En un arco radial aparecía la primera capa de ladrillos chaflanada hacia dentro por medio de piedras pequeñas o cascos que, amalgamados con mortero de barro, se extendían sobre las paredes laterales. Los ladrillos se colocaban de forma convexa hacia el interior del arco y solían ser de unos 30 a 40 centímetros de longitud y de 9 a 12 centímetros de grosor. Se han hallado ladrillos rectangulares y cuadrados. Se repetía dicho proceso y las capas de ladrillos se chaflanaban en ángulos más agudos, paulatinamente, hasta que el arco se cerraba con ladrillos colocados en posición vertical o semivertical. En los portales y pasadizos ligeramente abovedados se colocaban directamente, en capas sucesivas, uno sobre otro. Sin embargo, en habitaciones de bóvedas mayores se aparejaban las capas o se colocaban al tresbolillo, tal como en la construcción de un muro vertical.

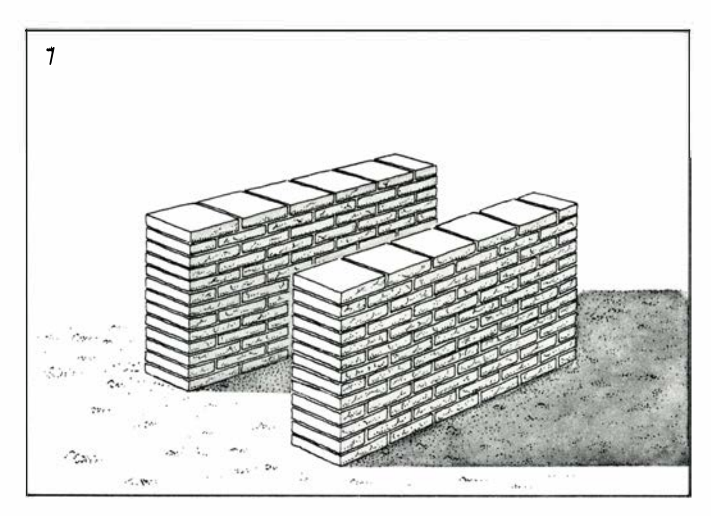
Parece probable que el arco y la bóveda radial derivaran de las ménsulas, técnica que era conocida y practicada desde épocas antiguas a lo largo del Próximo Oriente y de la zona del Mediterráneo. Las ménsulas eran el resultado de un proceso durante el cual capas sucesivas de ladrillo formaban saledizos en vez de chaflanarse hacia dentro: cada capa se colocaba de forma ho-

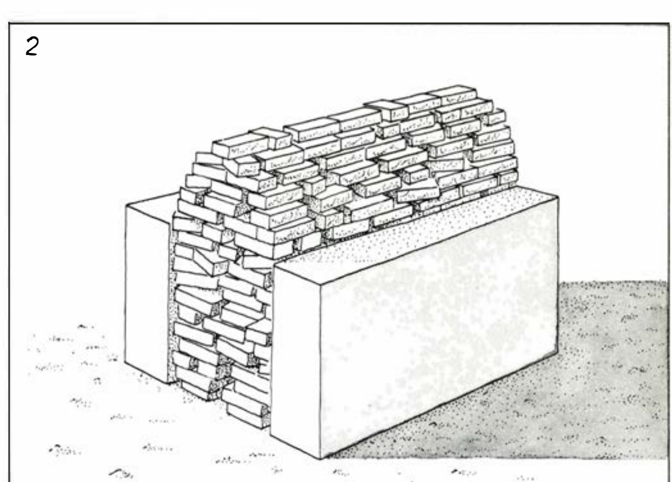


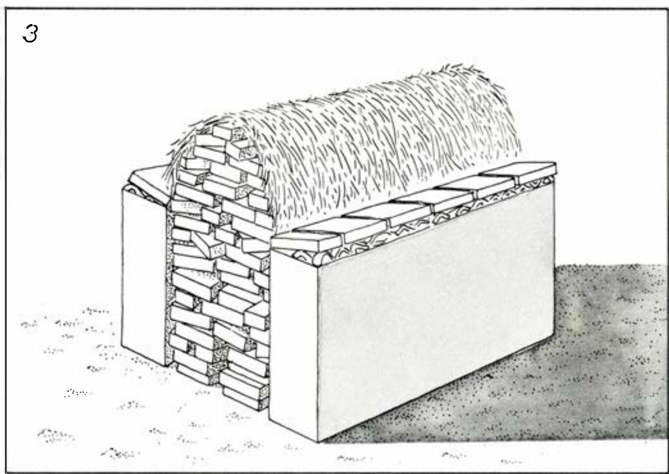
1. **BOVEDAS DE ADOBE** apuntalan los almacenes (*arriba*) del complejo mortuorio de Ramsés II, el gran faraón que llevó al imperio egipcio a su último apogeo en el s. XIII a.C. El conjunto arquitectónico, el Ramesseus, se halla en la orilla del Nilo opuesta a la ciudad de Luxor. Cada almacén está cubierto por una bóveda de ladrillo montado: los ladrillos están colocados, derechos, sobre los muros laterales y se inclinan hacia una pared extrema, que no se ha conservado. Cada bóveda está formada por cuatro capas o pisos de ladrillo; la fotografía de la parte superior de un muro lateral (*abajo*) nos muestra cómo las sucesivas capas de ladrillo que formaban la bóveda se inclinan en sentidos opuestos. Los almacenes guardaban las provisiones que el faraón precisaría en su vida en el más allá.

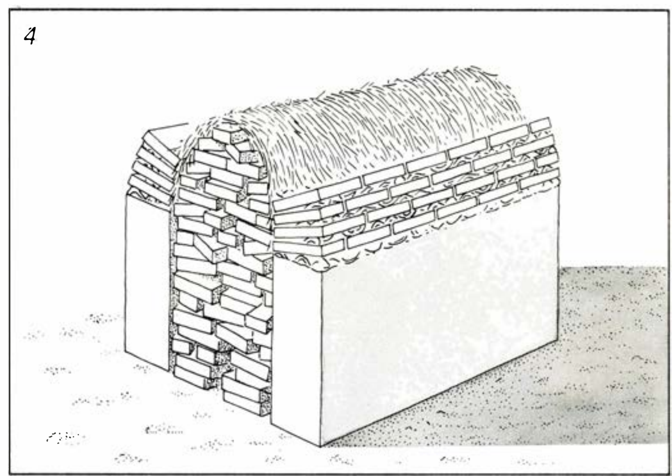
rizontal, de suerte que se proyectara sobre el extremo de la capa inferior. En Tell Razuk, Iraq, hay un edificio del 2900 a.C. que ejemplifica lo que serían las formas transitorias de evolución: tejados abovedados en los que las sucesivas capas son mensuladas y chaflanadas hacia dentro a la vez.

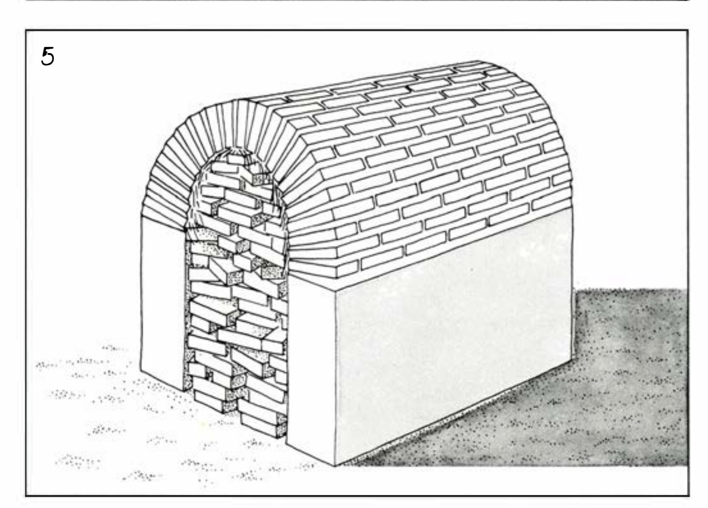
Durante la mayor parte de los períodos de la historia faraónica se construyeron en Egipto arcos y bóvedas radiales, de manera esporádica, en tumbas y puertas monumentales. La primera muestra conocida se halla en Helwan en una tumba de la primera dinastía (hacia el 3000 a.C.). Otra muestra un poco posterior, más instructiva, la constituye el pórtico arqueado de una mastaba (tumba en forma de banco de lados inclinados) que se encuentra en Giza; de la cuarta dinastía (entre el 2680 y el 2560 a.C.), perteneció al noble Neferi. Los ladrillos que forman el interior del arco fueron colocados de manera que parecieran haces de juncos arqueados, con dos molduras semirredondeadas en su superficie interior; el

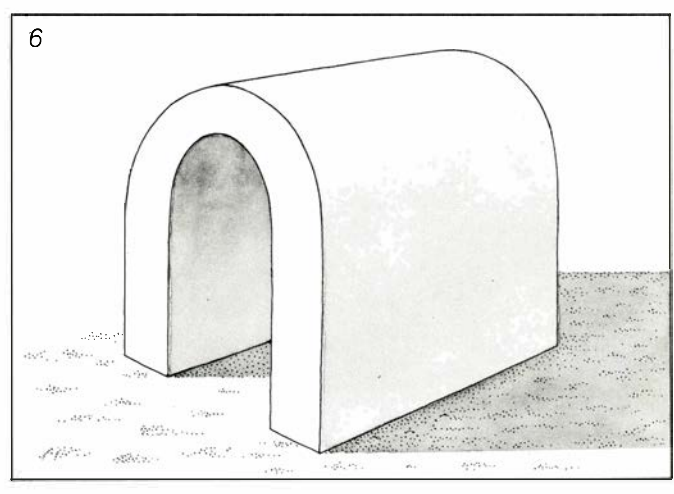










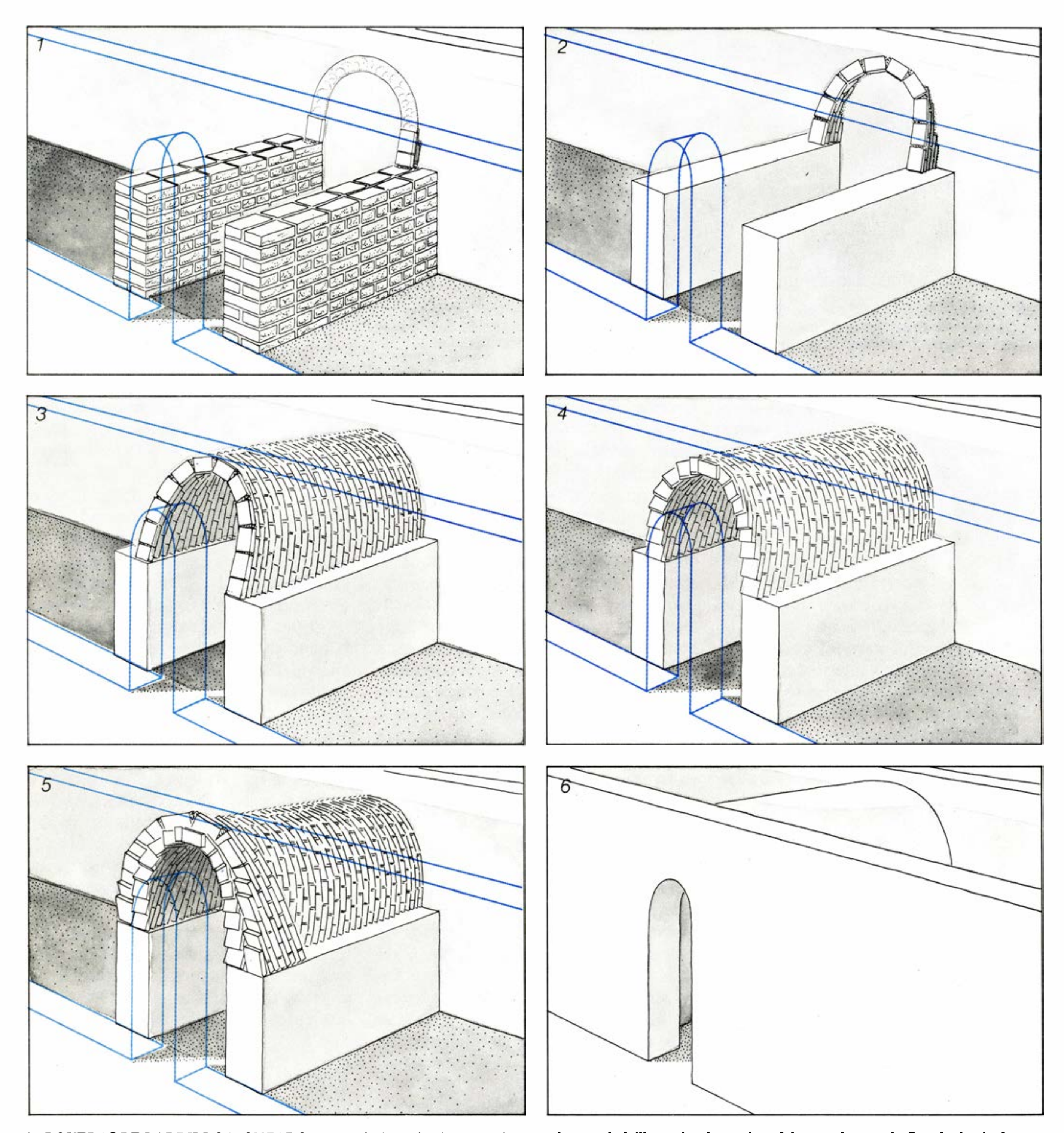


2. LAS BOVEDAS RADIALES generalizaron su uso en el Próximo Oriente desde el cuarto milenio a.C. hasta el primer milenio d.C. El primer paso para la construcción de una bóveda radial consistía en levantar las paredes laterales por completo (*1*). Los adobes, sin mortero, se apilaban entre las paredes para llevar a cabo el centrado, o apuntalamiento temporal, de la bóveda (*2*). El mortero de barro se extendía sobre el tramo superior de las paredes, mientras que se colocaban piedras pequeñas o cascos sobre los salientes externos con el objeto de chaflanar los ladrillos de la bóveda principal hacia dentro (*3*). Se colocaban los ladrillos boca abajo; los que aparecen aquí son los ladrillos cuadrados típicos de Mesopotamia, de 35 centímetros de longitud. Las capas sucesivas de ladrillo se aparejaban y chaflanaban hacia dentro con piedras y cascos, a su vez (*4*), hasta que la bóveda se cerraba por su parte superior (*5*). Al cabo de unos pocos días se retiraba el soporte, en cuanto se secara el mortero; la bóveda se cubría entonces con una capa de barro para protegerla del viento y la lluvia (*6*).

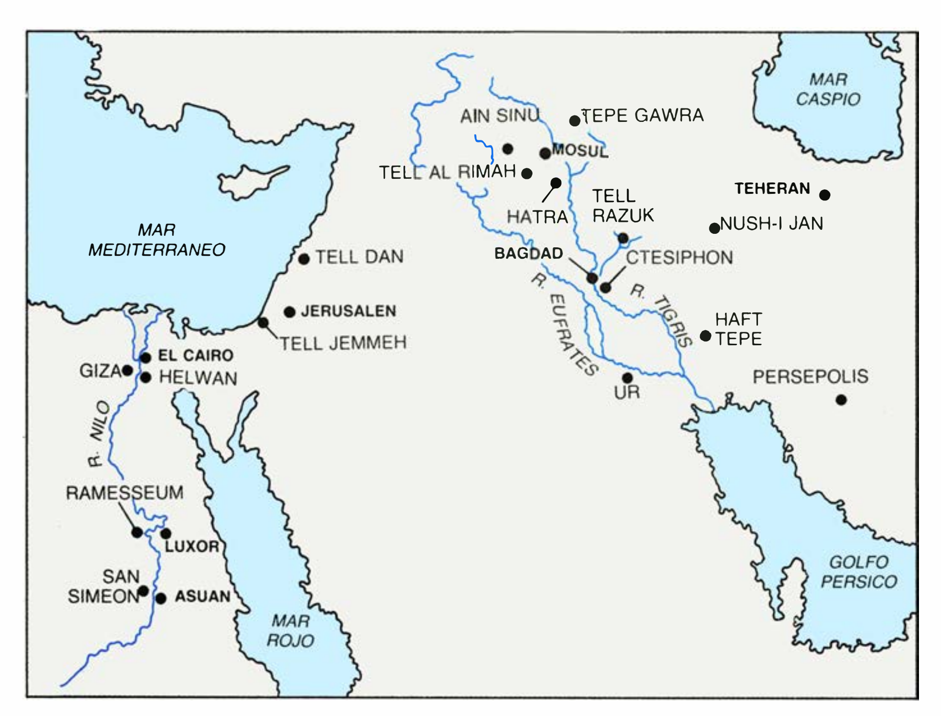
interior del arco estaba pintado, además, de un brillante e intenso color rojo, el color tradicional de los juncos secos del arte egipcio. Esta evidente imitación de juncos nos demuestra que los primitivos arcos de adobe eran hechos según el prototipo del junco.

El arco y la bóveda radial fueron, sin embargo, más utilizados en Mesopotamia, en donde evolucionaron seguramente de manera independiente y más o menos al mismo tiempo que en Egipto. La primera muestra conocida se halla en el salón de Tepe Gawra, de finales del cuarto milenio antes de Cristo, durante la aparición de la civilización sumeria. Las tumbas del rey Abargi y de la reina Shubad (construidas hacia el 2500 a.C.) se encuentran en Ur, el yacimiento sumerio más famoso, y tenían tejados abovedados y pórticos arqueados, radiales ambos.

Los arcos y bóvedas radiales de Mesopotamia más impresionantes se hallan en Tell al-Rimah, de finales del tercer milenio a.C. y de la primera mitad del segundo. En el complejo del



3. BOVEDAS DE LADRILLO MONTADO: no precisaban ningún apuntalamiento temporal durante el proceso de construcción. Se diseñaba la bóveda mediante una gruesa capa de mortero extendida sobre una pared extrema al tiempo que se colocaba el primer ladrillo, derecho, sobre la misma, siendo ese ladrillo chaflanado hacia dentro con piedras y cascos y apoyado contra el mortero (*1*). (Los ladrillos rectangulares que se ilustran aquí son egipcios.) El mortero se extendía por la superficie del primer ladrillo y se colocaba otro apoyado en éste; el tercer ladrillo se situaba encima del segundo y se chaflanaba hacia dentro, apoyándose sobre la pared extrema, y así hasta que el primer arco se cerraba por la parte superior (*2*). Arcos sucesivos se apoyaban en el primero hasta que se alcanzaba la pared extrema opuesta (*3*). El espacio triangular resultante se rellenaba con arcos menores y, por último, de piedras, cascos y mortero (*4*). Muy a menudo se solía colocar una segunda capa, montada en sentido contrario, sobre la primera (*5*). Una vez acabada, se recubría la bóveda de barro (*6*).



4. ESTE MAPA DEL PROXIMO ORIENTE nos muestra las excavaciones arqueológicas donde se han hallado arcos y bóvedas de ladrillo. Abarca yacimientos correspondientes a Egipto, Mesopotamia (en el valle de los ríos Tigris y Eufrates), Levante (la región costera oriental del mar Mediterráneo) e Irán.

templo de dicho emplazamiento hay habitaciones cuyos tramos de techo abovedado llegan a tener hasta 3,8 metros de anchura; una escalinata está apuntalada por ocho arcos radiales, de altura que aumenta de manera paulatina, y tres pasadizos construidos en medio de una monumental rampa de entrada conectan terraza con terraza. Asimismo, alberga pórticos arqueados, una cámara mortuoria abovedada y una serie de arcos radiales en dos niveles que apuntalaban una terraza o quizás, incluso, un edificio.

Las recientes excavaciones efectuadas en Israel han sacado a la luz las primeras muestras de arcos radiales de adobe en Levante. La más antigua es una puerta de Tell Dan, de arcos de ladrillo, del siglo XVIII a.C., formada por tres hiladas concéntricas o niveles. En el emplazamiento arqueológico de Tell Jemmeh, donde yo excavé, había cuatro arcos radiales que apuntalaban el techo que dividía el fogón de la cámara de hornear del gran horno de cerámica construido por los filisteos el siglo XII a.C. En otro lugar de la excavación hallé un arco de adobe de un tramo de 4,25 metros, longitud nada habitual, emplazado en un muro. Dicho arco apuntalaba el techo de un vasto granero circular del tercer siglo antes de Cristo.

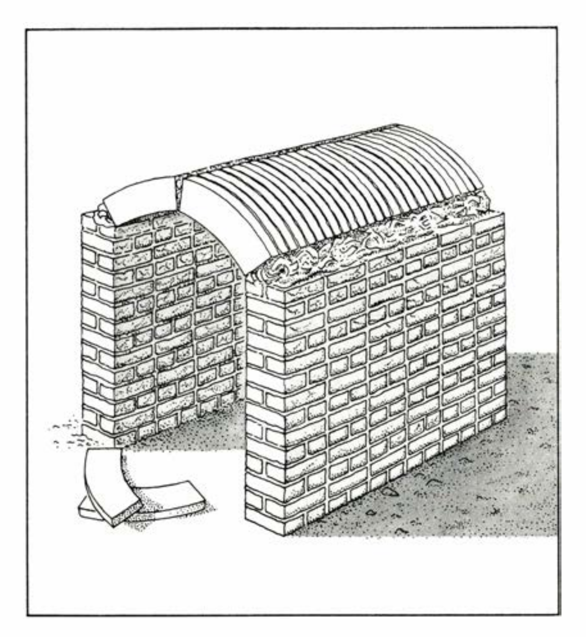
El conjunto de las excavaciones arqueológicas nos demuestra que los arcos y las bóvedas radiales fueron utilizados por doquier en el Próximo Oriente, desde el sur de Egipto hasta el oeste de Persia, y desde finales del cuarto milenio antes de Cristo hasta bien entrado el primer milenio de nuestra era. Sin embargo, el diseño radial recibió un duro golpe, pues arco y bóveda precisaban centrado, o ser apuntalados provisionalmente, mientras se secaban. Como la madera escaseaba, parece ser que se utilizaba normalmente una pila de adobes secos, sin mortero, tal vez cubierta con una capa de paja, para llevar a cabo el centrado. Es de suponer que el llenar una puerta o una habitación entera de ladrillos para retirarlos una vez que el arco o la bóveda se hubieran secado, requería un tiempo y un esfuerzo considerables.

El segundo método de construcción de bóvedas, llamado de ladrillo montado, no precisaba de centrado. Los ladrillos de las bóvedas de ladrillo montado eran más ligeros que los de las bóvedas radiales, ya que eran menores y más finos y porque se usaba más paja en la mezcla de ésta con el barro. De mayor relevancia que el peso de los ladrillos es la ingeniosa manera en que éstos se colocaban: se montaban o inclinaban contra una de las paredes últimas de la bóveda [*véase la figura 3*]. Se chaflanaban a la vez hacia dentro, como los ladrillos de una bóveda radial, por medio de piedras o cascos colocados bajo sus salientes externos. La bóveda acabada constaba de varios arcos de ladrillo inclinados; el agujero que quedaba en la pared del extremo opuesto se rellenaba con arcos menores, trozos de ladrillo, cascos, piedras y mortero.

La construcción de una bóveda de ladrillo montado podía detenerse en cualquier momento y la bóveda permanecería derecha sin necesidad de ser apuntalada en su interior, ya que cada arco apuntalaba al superior. El mortero de barro evitaba que los arcos se deslizaran, ya que se extendía entre los mismos de manera compacta. La succión del mortero mojado se veía incrementada por una interesante característica de los mismos ladrillos: cada ladrillo mostraba en un lado (y en Egipto a veces en los dos) una serie de surcos profundos, escopleados por los dedos del albañil mientras el mortero estaba húmedo. Los surcos hacían que el mortero actuara sobre un área de superficie mayor y con ello se conseguía una succión más intensa que resultaba en una mayor adherencia de los ladrillos.

La técnica del ladrillo montado se aplicaba de distintas maneras. A veces se construía una bóveda desde las dos paredes extremas. Dicha práctica no era particularmente acertada ya que, en vez de tener que rellenar un pequeño espacio triangular en un extremo, el albañil se veía obligado a rellenar un mayor espacio elipsoide en el centro, allí donde se encontraban los arcos inclinados de forma opuesta. El grosor de la bóveda se aumentaba en ocasiones colocando hiladas adicionales sobre la primera, una vez cubierta la habitación por una capa de ladrillos abovedada. En Mesopotamia, donde se usaban ladrillos cuadrados, bastaba una sola capa adicional para conseguir el grosor deseado. Egipto, que prefería los ladrillos estrechos y rectangulares, reforzaba las bóvedas con unas cuatro capas, o más. Las capas alternadas se inclinaban en sentidos opuestos: la primera capa se apoyaba en una pared extrema mientras que la otra lo hacía contra la opuesta, y así sucesivamente.

El primer ejemplo conocido de bóveda de ladrillo se halla en Helwan, en la misma tumba del final de la primera dinastía (hacia el 3000 a.C.) que contenía la bóveda radial egipcia más antigua. El maduro diseño de la bóveda de ladrillo parece indicarnos, sin embargo, que dicha técnica habíase empleado con anterioridad y que algunas muestras de la misma no se han conservado o no se han descubierto todavía. En algunas de las muchas bóvedas de la cuarta dinastía se evidencia cierta innovación, principalmente en





5. CONSTRUCCION DE LAS BOVEDAS DE CRUCERIA con un par de largos adobes, ligeramente curvados, que, apoyados entre sí, se colocaban en el centro de la estancia. Los huecos que quedaban entre los ladrillos y los extremos de éstos con los muros laterales se rellenaban de cascos y mortero. En Nush-i Jan, Irán, en el interior de un templo construido entre el 750 y el 600 a.C. (*derecha*) hay una bóveda de crucería que apuntalaba el piso de una habitación superior. Los ladrillos de las bóvedas son de unos 120 centímetros de longitud. David B. Stronach, profesor hoy en Berkeley, excavó este yacimiento.

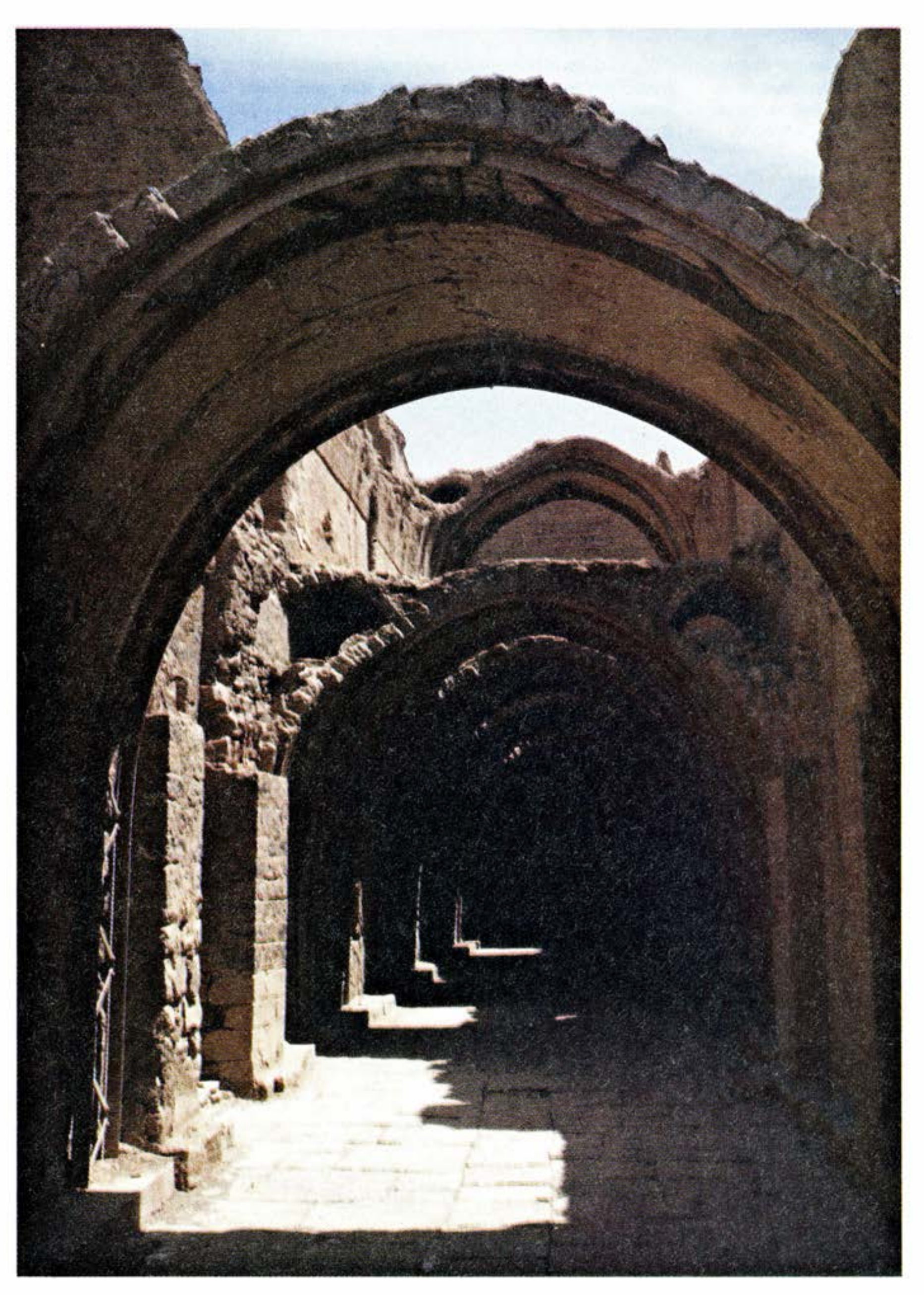
LADRILLO MONTADO

1 METRO

6. DOVELAS, o ladrillos colocados en cuña; reforzaron arcos y bóvedas. Las dovelas más antiguas se hallan en un edificio asirio del s. VII a.C. de Tell Jemmeh. Las tres habitaciones de que consta la planta son de diferente amplitud, mas las bóvedas del techo fueron construidas para que tuvieran la misma altura: por ello las bóvedas de las habitaciones más espaciosas se hicieron más aplanadas. Las bóvedas eran de un grosor equivalente a un ladrillo y tres cuartas partes: en cada capa se alternaban arcos de ladrillo del tamaño habitual con otros de ladrillo que equivalía a unas tres cuartas partes del ladrillo normal.

la forma de los ladrillos. Uno de los experimentos más interesantes se halla en la mastaba del sacerdote Sabef, en la necrópolis de Giza. Los ladrillos de dicha bóveda tienen salientes triangulares en ambos extremos, lo que permitía que éstos encajaran con otros ladrillos vecinos del mismo arco. Aunque en teoría dicha práctica reforzara la bóveda, los ladrillos se encogían al secarse, lo que provocaría que éstos no encajaran correctamente; asimismo, es posible que los salientes triangulares se rompieran durante el proceso de construcción. Todos estos problemas parecen dar respuesta al porqué no se han hallado otras bóvedas de adobe con ladrillos encajados.

Por otro lado, en todos los períodos de la historia egipcia, desde la antigua a la moderna, se encuentran bóvedas de cañón construidas con ladrillos montados rectangulares: en cámaras mortuorias y anexos tales como salas de ofrendas; en soportes de techos y tejados de casas comunes; en agujeros de ventilación en forma de cúpula de tejados planos; como puntales de escaleras y techumbre de las mismas, y en almacenes, templos y monasterios. Las bóvedas de ladrillo montado acabarían por reemplazar a las radiales de manera general. El diseño radial siguió considerándose óptimo para las puertas y las bóvedas abiertas, las cuales no poseían la pared extrema que el diseño de ladrillo montado precisaba; mas, debido a la tradición que su uso implicaba, persistió en otro tipo de construcciones.



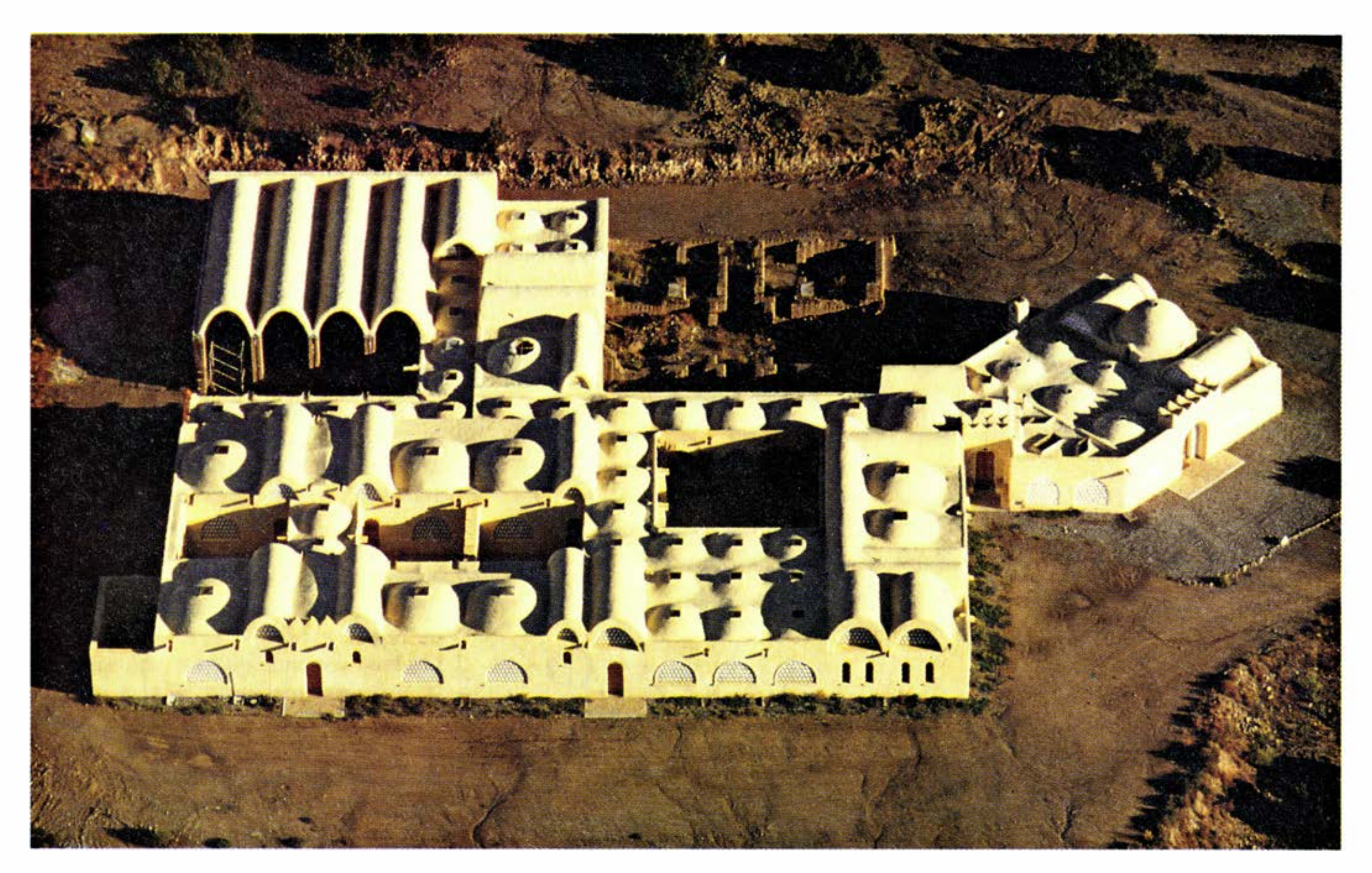
7. **MONASTERIO DE SAN SIMEON, construido en Aswan, el s. VII d.C. Muestra sorprendentes ejemplos de bóvedas de ladrillo. Aquí aparece el corredor del monasterio. Las bóvedas que apuntalaban el piso de otro corredor superior y abovedado se reforzaron más tarde con acero. El abovedar de nuevo el espacio entre las bóvedas principales y las paredes del corredor permitía la conducción del aire hacia las celdas.**

Las bóvedas de más alta calidad de la época faraónica se encuentran en Luxor, en los almacenes construidos por Ramsés II (que reinó desde el 1290 hasta el 1224 a.C. aproximadamente) en su complejo mortuorio: el Ramesseum. Estos almacenes, largos y estrechos, se destinaban al almacenaje de las provisiones que el soberano necesitaría en la vida ultraterrena. En cada uno de los edificios, las paredes laterales aparecen cubiertas por cuatro capas de ladrillo mensulado; estas ménsulas forman anchas plataformas de las cuales arrancan gruesas bóvedas. Cada bóveda está formada por cuatro capas de ladrillo montado, como mínimo, con cuatro capas alternadas e inclinadas hacia paredes extremas opuestas.

En el monasterio copto de San Simeón, Aswan, construido en el s. VII d.C., unos dos mil años después que el Ramesseum, aparece reflejada la extraordinaria adaptabilidad de la bóveda de ladrillo, tanto en forma como en función. Las bóvedas que se extendían a lo largo de la iglesia (y que ahora tan sólo se conservan en los lados del presbiterio) no eran únicamente simples bóvedas de cañón: bóvedas cruzadas de la nave las intersecaban originalmente. Las bóvedas de ladrillo sobre el corredor inferior constituían un ingenioso sistema de ventilación para las celdas de los monjes. Unas bóvedas secundarias, que ocupaban el espacio que las curvas de la bóveda principal formaban con las paredes laterales, conseguían aligerar la carga sobre la bóveda principal y conducir el aire fresco nocturno al interior de cada celda.

En Mesopotamia las bóvedas de ladrillo montado más antiguas se encuentran en Tell al-Rimah; se construyeron hacia el 2000 a.C., unos mil años tras la aparición de dicha técnica en Egipto. En Tell al-Rimah hay una serie de bóvedas erigidas desde el 2000 al 1350 a.C. y algunas de ellas muestran interesantes variantes de la técnica: algunas bóvedas que ayudaban a apuntalar un edificio o terraza son, por ejemplo, en forma de cúpula. Para elevarlas se construían paredes extremas de la misma altura que las laterales, mientras que un abanico de ladrillo (una pechina) se colocaba en cada esquina, de tal forma que se proyectaba hacia arriba y hacia el interior de la habitación. La abertura octogonal resultante estaba abovedada por arcos apoyados en las pechinas y las paredes extremas.

No muy lejos de Tell al-Rimah, en Tell Taya, otro templo del s. XVIII a.C.,



8. BOVEDAS DE ADOBE MODERNAS construidas al estilo tradicional apuntalan los edificios de la fundación cultural Dar al Islam de Abiquiu, Nuevo México, complejo diseñado por el arquitecto egipcio Hassan Fazi. A la derecha hay una mezquita. El resto de edificios pertenecen a una escuela y los que aún están por acabar, arriba a la izquierda, serán una cafetería. El mundo moderno ha redescubierto las ventajas del adobe y, con ello, el valor de arcos y bóvedas.

se ha desenterrado otro arco mesopotámico, así como en los tejados de dos cámaras mortuorias del s. XV a.C. en Haft Tepe, Irán. Sin embargo, no se ha hallado ninguno del primer milenio a.C., quizá porque no se haya conservado o porque aún no haya sido descubierto. Las bóvedas de ladrillo vuelven a aparecer en varios emplazamientos durante el primer milenio d.C. En realidad, el cenit de la bóveda de ladrillo aparece en el Taq Kisra, un gran salón del palacio de Ctesifón, al sur de Bagdad, que fue construido entre el s. III y VI d.C., si bien las fechas exactas de su construcción no se han esclarecido todavía. El Taq Kisra se levantó, principalmente, con ladrillos en vez de los tradicionales adobes. Hoy en día su altura es de 28,4 metros y su arco, sin soporte alguno, mide 25,5 metros de longitud, por lo que es la bóveda de ladrillo sin soporte mayor del mundo [*véase la portada*].

Si tenemos en cuenta los restos arqueológicos podemos concluir que fue en Levante, y no en Egipto o Mesopotamia, donde se dio el mayor avance tecnológico en la construcción de bóvedas de ladrillo montado. Fue en Levante donde se usaron por primera vez las dovelas, o ladrillos colocados en forma de cuña, las cuales ahorraban el esfuerzo que la introducción de cascos y piedras bajo los salientes de los ladrillos suponía. Las bóvedas construidas con dovelas eran sin duda más resistentes, pues los ladrillos estaban en contacto unos con otros y el mortero se hallaba comprimido en juntas muy estrechas. Los ladrillos, colocados en forma de cuña, permitían que la bóveda fuera más plana; gracias a ello, no sólo se obtenía un arco semicircular, sino que también la flexibilidad de que disponía el arquitecto le permitía diseñar un edificio con habitaciones abovedadas de diferente grosor, consiguiendo de paso que el techo, o un piso superior, se mantuviera a una altura uniforme.

El arquitecto asirio que diseñó la planta de un gran edificio de Tell Jemmeh hacia el 675 a.C., adoptó dicha técnica, y fue allí donde encontré las bóvedas de dovelas más antiguas conocidas. El edificio consta de tres habitaciones. Cada habitación de la planta tiene un grosor distinto, así como una bóveda de ladrillo con un arco diferente: este arco es más bajo en las dos habitaciones más espaciosas mientras que en la más estrecha adquiere una forma más semicircular. La anchura media de un ladrillo empleado para la construcción de una bóveda es de 30 centímetros en su extremo superior y de 25,5 centímetros en su extremo inferior; ahora bien, como es natural, los ladrillos que forman las bóvedas más bajas se estrechan menos que aquellos que forman la más semicircular.

Por extraño que nos resulte, en la construcción de las puertas de comunicación entre las habitaciones aparece un tercer tipo de bóveda, la de crucería, cuyo diseño parece menos refinado incluso que el radial o el de la bóveda de ladrillo montado. Esta bóveda consta de seis pares de largos ladrillos arqueados sobre cada puerta; un extremo de cada ladrillo se apoya en una pared lateral mientras que el otro apuntala el ladrillo siguiente hacia el centro de la puerta. Los huecos que quedaban entre los extremos de los ladrillos se rellenaban de piedras, cascos y mortero.

La bóveda de crucería, al parecer usada primordialmente en Irán, pudo haber sido introducida en Tell Jemmeh por un constructor meda al servicio de las fuerzas imperiales asirias. El uso de dicho tipo de bóveda se generalizó en Nush-i Jan, emplazamiento iraní del período comprendido entre el 750 y el 600 a.C. Los ladrillos que forman las

bóvedas son enormes: de unos 1,2 metros de longitud. A pesar de ello, no dejan de ser lo suficientemente resistentes como para apuntalar un techo o una habitación superior del templo central. No obstante, podemos afirmar que una bóveda de crucería no era tan resistente como otra radial o de ladrillo, por lo que aparte de lo simple de su construcción pocas ventajas más podía ofrecer.

La dovela, por otro lado, sí que representaba indudables ventajas. Su uso, sin embargo, no se generalizó todo lo que era de esperar en el antiguo Próximo Oriente. Aparte de las de Tell Jemmeh se han hallado bóvedas formadas por dovelas en el puesto fronterizo romano de Ain Sinu únicamente, al norte de Irak. Tal vez algún día se desentierren más muestras de este tipo de bóvedas; aunque si no fuera así podríamos concluir que las ventajas que la aplicación de dicha técnica suponía no compensaban el esfuerzo extra que la fabricación de ladrillos a medida para cada bóveda implicaba. Tan sorprendente como el aparente fracaso de la bóveda de dovelas es el porqué ésta no apareció hasta el s. VII a.C., por qué los pueblos del Próximo Oriente que habían inventado la escritura, las leyes, las matemáticas y la astronomía, y, sobre todo, las ciudades, no pensaron en construir sus arcos y bóvedas con ladrillos colocados en forma de cuña hasta unos dos mil años más tarde.

La invención de los arcos y bóvedas de adobe, sin embargo, constituía en sí un considerable logro. La construcción de arcos en el Próximo Oriente jamás decayó del todo y hoy en día vuelve a gozar de popularidad. El arquitecto egipcio Hassan Fazi ha sido el inspirador de este renacimiento, ya que con sus brillantes e imaginativos diseños, cuyos protagonistas son bóvedas de ladrillo montado, ha atraído a multitud de seguidores no tan sólo en su país natal sino también en Estados Unidos. El mundo moderno ha vuelto a descubrir las ventajas del adobe como material de construcción y, con ello, el valor práctico de arcos y bóvedas.

Pero no quiero resaltar únicamente sus ventajas prácticas, ya que no deberíamos olvidar la belleza que los arcos y bóvedas de dicho material poseen. En un mundo visual, tantas veces dominado por formas rectangulares y cuadradas, los arcos y las bóvedas permiten aliviar la monotonía y severidad rectilíneas mediante la introducción de la forma más común que la naturaleza nos ofrece en infinitud de variantes: la curva.

Juegos de ordenador

Indagando en la extraña atracción del caos físico

A. K. Dewdney

Ofrece el caos extraños atractivos a la mente capaz de percibir regularidades en él. Algunos sistemas físicos que manifiestan conductas caóticas lo hacen porque en cierto sentido se encuentran atraídos hacia tales regularidades. Por si fuera poco, las propias pautas de regularidad resultan extrañamente atractivas. No serán pocos los lectores que ya tengan noticia de que las formas geométricas subyacentes al caos se denominan atractores caóticos, o atractores extraños [véase "Caos", por James P. Crutchfield, J. Doyne Farmer, Norman H. Packard y Robert S. Shaw; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero de 1987]. Pueden generarse atractores extraños con un ordenador doméstico.

Antes de partir en mi compañía es preciso que los lectores se equipen con un revestimiento protector de intuición física. En concreto, ¿qué es un atractor? A *grosso modo*, los atractores son generalización de la noción de equilibrio. Un atractor es aquello hacia lo que tiende el comportamiento de un sistema, aquello hacia lo que es atraído. El péndulo constituye un sistema físico sencillo que permite ilustrar el concepto de atractor. Supongamos que un péndulo ordinario se mueve, sometido a la acción de fuerzas de rozamiento, que frenan su oscilación hasta detenerlo por completo. El movimiento del péndulo puede describirse mediante un diagrama, llamado de fases, o de estado, en el cual, en un sistema cartesiano, se representa gráficamente el ángulo que forma el péndulo con la vertical en función del ritmo de variación del ángulo. El movimiento de oscilación del péndulo queda representado en el diagrama de fases por un punto que da vueltas en torno al origen; conforme va el péndulo perdiendo energía, el punto del diagrama de fases traza una espiral que converge hacia el origen, donde termina por quedar en reposo. Se dice en este caso que el origen es un atractor, porque parece atraer al punto móvil del diagrama de fases. Los lectores estarán en lo cierto al considerar que no hay nada de extraño en un atractor compuesto únicamente por un punto.

Bajo el movimiento del viejo reloj de pared de nuestros abuelos subyace un atractor ligeramente más complicado. En este caso, un mecanismo de escape provee de energía a un péndulo para evitar que su oscilación vaya amortiguándose. Si ponemos el reloj en marcha dándole al péndulo un enérgico impulso inicial, claramente excesivo, el péndulo frenará su oscilación hasta batir al *tempo* que le marca el escape, y luego ya no perderá velocidad. En cambio, si el impulso dado inicialmente al péndulo es escaso, el péndulo del reloj se comportará como un péndulo ordinario: irá oscilando cada vez más lentamente y acabará por detenerse del todo. En el caso del impulso enérgico, la representación del movimiento en el diagrama de fases es una espiral cuyos giros van ciñendo cada vez más estrechamente a una órbita circular. El atractor es aquí un bucle circular. Ciertamente que en este contexto nada tiene de más extraño un círculo que un punto.

Podemos lograr que el péndulo manifieste un comportamiento caótico introduciendo un movimiento vibratorio vertical. Si se mueve arriba y abajo el punto de suspensión por medio de un motorcito eléctrico, según una ley sinusoidal, el péndulo puede comenzar a balancearse alocadamente, sin dar muestras de periodicidad alguna en su comportamiento.

No obstante, para introducir el caos he optado por un sistema físico diferente. Imaginemos un montaje de tres amplificadores, en el cual la señal de salida, x, del primer amplificador alimente a los otros dos. Al recibir la señal x, el segundo amplificador responde emitiendo la señal $1 - x$. El tercer amplificador recibe como entradas las dos señales x y $1 - x$, genera el producto $x(1 - x)$ y lo envía al primer amplificador, el cual recibe también como señal de entrada una tensión de control, r. Completa el circuito otro componente, un dispositivo encargado de tomar muestras de su entrada y entregar como salida, durante un breve tiempo, la misma tensión. Este dispositivo se inserta en la línea de salida del primer amplificador. En este circuito tri-amplificador las tensiones ejecutan una danza que resulta más febril y turbulenta al aumentar gradualmente la tensión de control r.

Cuando r es menor que 3, y el valor a que inicialmente ha sido ajustado x es no nulo, el circuito oscila brevemente y se estabiliza enseguida en un valor específico de x que permanece constante a partir de ese momento. Si se eleva entonces la tensión de control r hasta ajustarla en un valor situado ligeramente por encima de 3, el circuito se hace inestable y va saltando entre dos valores de x. En ese nivel de r se dice que el circuito es biestable; el atractor consta de dos puntos. Al aumentar r más todavía, el circuito oscila entre cuatro puntos; una nueva elevación produce un atractor de ocho puntos. Esta regla de duplicación y reduplicación prosigue a medida que se gira el mando de control de r hacia valores más elevados, hasta que, al llegar a un valor situado aproximadamente a medio camino entre 3 y 4, el circuito enloquece de repente. Persigue interminablemente, a velocidad electrónica, las sencillas regularidades recurrentes que marcaron su existencia anterior. Su comportamiento está regido ahora por un atractor extraño que tiene un conjunto potencialmente infinito de valores. El resultado es el caos.

Los lectores que posean conocimientos de electrónica quizá se animen a construir tal circuito. Otros pueden efectuar una simulación en un ordenador de tamaño cualquiera y contemplar con toda claridad la danza en la pantalla del monitor. Para ello sólo se requiere redactar un sencillo programa que calcule iteracciones de la transformación $x \leftarrow rx(1 - x)$. El núcleo del programa, al que llamo CAOS1, consta de seis instrucciones:

```
x ← 0,3
desde  i ← 1 hasta 200
       x ← rx(1 − x)
desde  i ← 1 hasta 300
       x ← rx(1 − x)
       representar (200x, 100)
```

A la variable x se le da inicialmente el valor 0,3. A continuación, CAOS1 entra

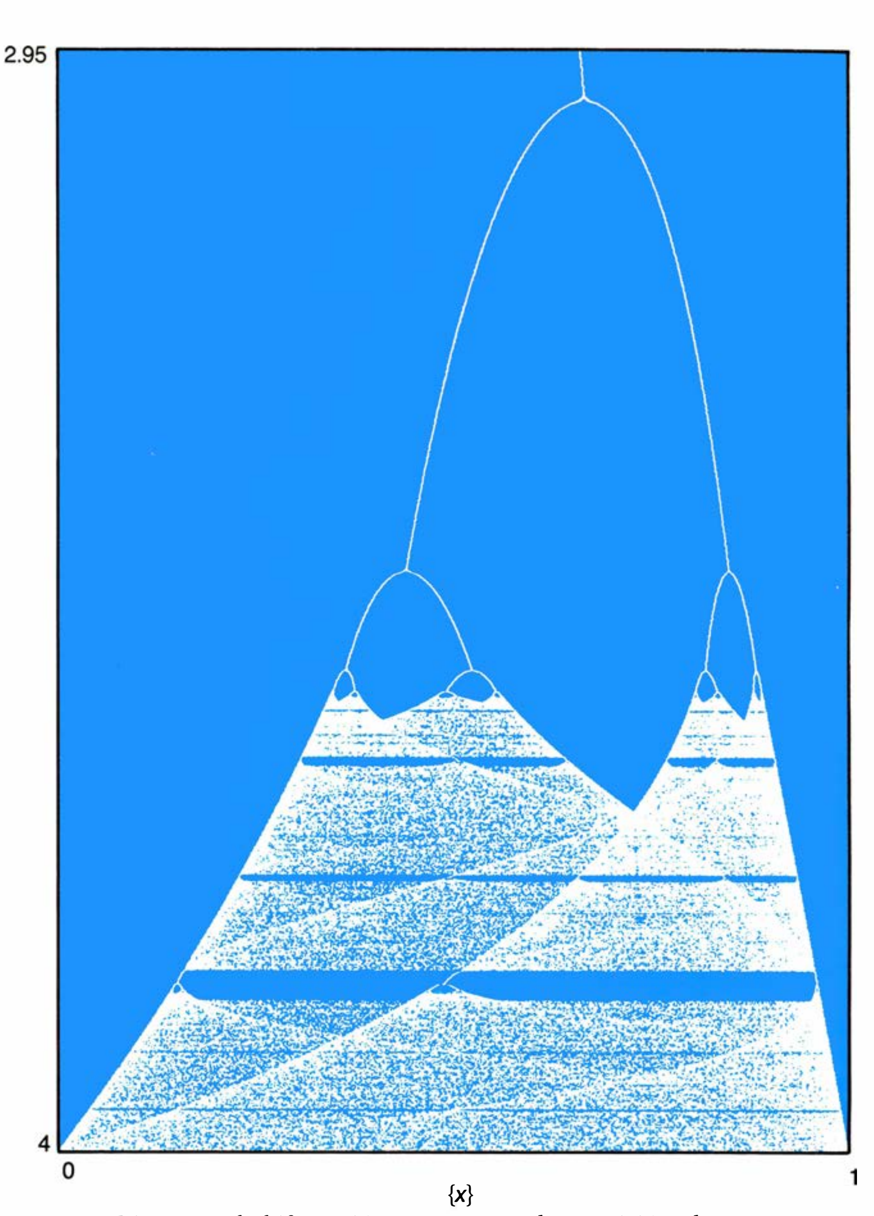
en un bucle que itera 200 veces la transformación fundamental, para permitir la extinción de los transitorios, que no son debidos a imprecisiones aritméticas, sino inherentes a la transformación. Las razones de que así sea recibirán más adelante explicación geométrica. El programa entra seguidamente en nuevo bucle, donde se itera la transformación otras 300 veces, representando gráficamente el valor de x en cada ocasión.

El número 100 que figura en la instrucción de representación gráfica tiene más de genérico que de específico. Se ha supuesto que la pantalla tiene unas dimensiones de 200 por 200. La abscisa (o coordenada horizontal) es $200x$, al objeto de esparcir sobre toda una línea de la pantalla los valores calculados para x (que están siempre comprendidos entre 0 y 1). Esa línea horizontal se encuentra a una altura 100, a mitad de la hipotética pantalla.

Según el valor al que se ajuste r, la variable de control, el programa representará bien 300 veces un mismo punto, bien varios puntos menos de 300 veces cada uno. Puede incluso que el programa trate de capturar el caos representando 300 puntos distintos de un atractor extraño. Aumentando el límite de la iteración podrá verse una porción mayor del atractor. En todos los casos, una vez estabilizado el proceso de iteración, los valores de x saltan sistemáticamente de uno a otro punto del atractor. Los atractores reciben también el nombre de órbitas, independientemente de que tengan número finito o infinito de puntos.

Dispondremos de una imagen completa del comportamiento de este sencillo circuito amplificador haciendo que el programa calcule un sinfín de puntos, que iremos representando gráficamente dispuestos en hileras, cada una debajo de la última calculada [*véase la figura 1*]. Las hileras representadas corresponden a la secuencia de valores que van desde 2,9 hasta 4 en 200 pasos, dispuestas de arriba abajo de la pantalla. La imagen obtenida es mucho más elegante si en lugar de 200 se toma un número mayor de pasos, 4000, por ejemplo, pero entonces el diagrama no cabrá en la pantalla y será necesario trazarlo en papel para verlo como un todo.

Para valores de la variable r menores que 3,56 (el valor de precisión máxima es 3,56994571869), los atractores del sencillo sistema dinámico plasmado en la iteración $x \leftarrow rx(1 - x)$ constan de unos pocos puntos, que representan comportamientos no caóticos y están dispuestos en tres bandas grandes y en infinidad de otras más pequeñas. Cuando r se aproxima al valor 3,56 los atractores adquieren carácter extraño. En ese punto sobreviene el caos y las líneas que, hasta él, iban bifurcándose, sufren súbitamente una especie de locura; la gráfica adquiere aspecto granulado, como de sal y pimienta. Y lo que es bastante extraño, el régimen caótico desaparece de vez en cuando durante la inexorable marcha de r hacia el valor 4.

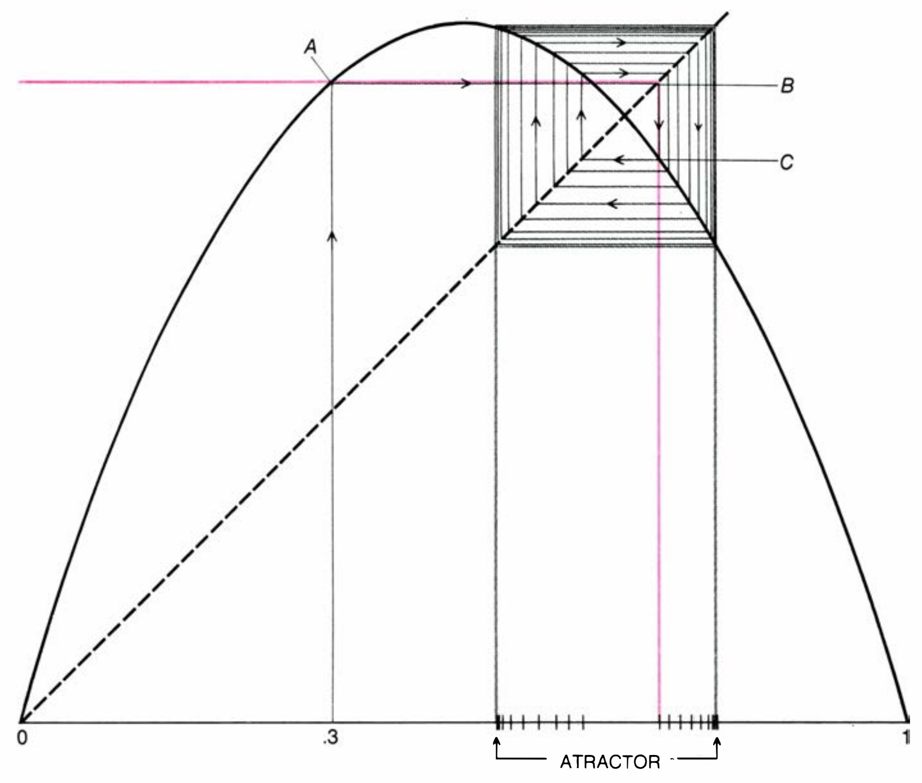


1. Diagrama de bifurcación que muestra la transición al caos

El gráfico completo se denomina diagrama de bifurcación. Visto de lado, con la mirada al ras de la hoja, nos recuerda el espectro de una estrella llamada x. La gráfica está adornada con airosas curvas y plisados atractivamente sombreados. Las razones de estos detalles ornamentales son misterios que sólo se pueden desvelar merced a la teoría del caos. Tocaré un poco más este asunto dentro de poco. Por el momento ocupa la mente de los lectores un misterio más inmediato: ¿por qué se comporta tan extrañamente una transformación en apariencia tan inocente?

Podemos simular gráficamente la conducta de la transformación para valores no caóticos de r representando la ecuación $y = rx(1 - x)$, una parábola, donde x es la abscisa e y la ordenada. Superpongamos ahora sobre la parábola la gráfica de la recta $y = x$, que es bisectriz del primer cuadrante. Hemos seguido este procedimiento en la figura 2, donde r se ha ajustado a 3,3, valor en el cual el atractor del sistema consta de dos puntos. Para mostrar el comportamiento del sistema se toma un valor inicial de x. Aquí he seleccionado 0,3, pero casi cualquier otro valor serviría igual de bien.

La primera iteración de la transformación se simula trazando una línea



2. La simulación geométrica de un sistema sencillo revela un atractor formado por dos puntos

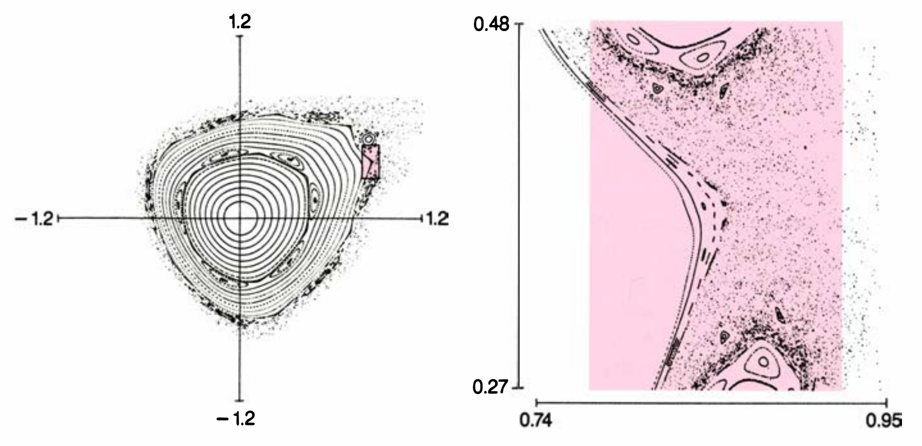
vertical que arranca del punto $x = 0{,}3$, al pie de la gráfica, y se prolonga hacia arriba hasta que corta la parábola. He señalado con A el punto donde la recta intercepta la parábola. La altura de la intersección determina el correspondiente valor de y. En la segunda iteración tal valor de y se realimenta en la transformación, asignándoselo a la variable x. Gráficamente, tal procedimiento equivale a medir la altura de la intersección, marcarla sobre el eje horizontal y trazar otra recta vertical que suba desde esa marca hasta encontrar la parábola. Tomaremos ahora un atajo, que consiste en trazar una recta horizontal desde el punto A hasta la bisectriz $y = x$; llamaré B al nuevo punto de intersección. Fijémonos en que el punto B y el origen yacen en vértices diagonalmente opuestos de un cuadrado, cuyos lados tienen longitud igual al valor de y determinado en la primera iteración. En consecuencia, el valor de y puede realimentarse en el sistema trazando una línea vertical desde B hasta alcanzar la parábola (punto C). Repitiendo continuamente el procedimiento de subir verticalmente hasta tropezar con la parábola y horizontalmente después hasta llegar a la bisectriz se obtiene una trayectoria rectangular que va describiendo una espiral que se cierra en torno a un cuadrado.

Esa receta geométrica remeda el procedimiento que constituye el núcleo de CAOS1. Los dos lugares donde el cuadrado resultante intercepta la parábola corresponden al atractor de dos puntos. Los programadores más inquietos podrían emprender el interesante proyecto de generar tales figuras mediante ordenador. Al hacerlo, nuestros investigadores de sillón adquirirían una visión más profunda de la "sencilla" transformación iterativa objeto de estudio. Específicamente, ¿qué aspecto adquieren las figuras al instaurarse el caos? ¿Son aleatorios los números aparentemente aleatorios generados por los valores de r que producen caos?

Debo la idea de hacer una excursión por el caos a gran número de lectores que escribieron sugiriéndola. Entre ellos se cuenta James P. Crutchfield, uno de los autores del artículo "Caos" al que aludimos anteriormente. Crutchfield y sus coautores explican que "la clave para comprender el comportamiento caótico estriba en la comprensión de una sencilla operación de dilatación y plegamiento que tiene lugar en el espacio de estados". En el caso del sencillo sistema amplificador, el espacio de estados es un segmento rectilíneo que contiene los puntos atractores y el punto que representa el valor actual de x. ¿Dónde intervienen, pues, el estiramiento y el plegamiento?

La iteración de la transformación $x \leftarrow rx(1 - x)$ equivale a ir aplicando los puntos comprendidos entre 0 y 1 en una curva parabólica. Puntos que se encuentran cercanos en el intervalo unidad, especialmente los más próximos a 0, acaban bastante más separados cuando se aplican en la curva parabólica. Ello ocurre, evidentemente, cuando se remplaza el número x por el número $rx(1 - x)$. La operación de plegamiento es consecuencia de la simetría axial de la parábola; a excepción del vértice de la curva, siempre hay dos puntos del intervalo unidad que se aplican en el mismo valor $rx(1 - x)$. Esos puntos son, evidentemente, x y $1 - x$.

Los especialistas en caos han analizado gran parte de la estructura del diagrama de bifurcación. Los confines de las regiones caóticas quedan establecidos por los valores máximo y mínimo de las iteracciones de $x = 0{,}5$. Las curvas descritas por los máximos y mínimos, así como las seguidas por los velos que tan extrañamente cuelgan de las regiones caóticas, son todas ellas polinomios sencillos en r. Los lugares



*3. Las sucesivas órbitas de una transformación de Hénon (**izquierda**) degeneran en caos (**derecha**)*



*4. La transformación de Hénon engendra figuras distintas para a = 0,264 (**izquierda**) y a = 1,5732 (**derecha**)*

donde el sombreado es más denso corresponden a las máximas concentraciones de los atractores extraños que los cruzan. En las bandas vacías antes mencionadas el caos cede el paso al orden. La teoría sostiene que para cada número entero existe una banda (por estrecha que sea) con órbitas que tienen precisamente ese número de puntos. Finalmente, los lectores familiarizados con el caos no se sorprenderán al saber que los atractores extraños, incluso en el humilde sistema recién explorado, tienen naturaleza fractal; un número infinito de puntos muestran detalle interesante a todos los niveles de ampliación, como el conjunto de Mandelbrot descrito en esta sección en octubre de 1985.

Más complejos son los sistemas dinámicos plasmados en las ecuaciones de Hénon, así llamadas en honor de Michel Hénon, matemático francés. No sólo describen el movimiento de asteroides y el goteo de los grifos, sino que generan además preciosas imágenes. Las transformaciones de Hénon no están definidas por una ecuación, sino por dos, por ejemplo:

$$x \leftarrow x\cos(a) - (y - x^2)\text{sen}(a)$$
$$y + x\text{sen}(a) - (y - x^2)\cos(a)$$

Los valores actuales de dos variables, x e y, se inyectan en los segundos miembros de ambas ecuaciones para producir nuevos valores (simbolizados igualmente x e y) en los primeros miembros.

El programa llamado CAOS2 saca partido de ambas ecuaciones con el fin de obtener imágenes del orden y el caos intrínsecos a una clase bastante amplia de sistemas dinámicos. El núcleo del programa CAOS2 es similar al de CAOS1:

```
introducir x e y
desde i ← 1 hasta 1000
        xx ← xcos(a) − (y − x²) sen(a)
        y ← xsen(a) + (y − x²) cos(a)
        x ← xx
        representar (100x, 100y)
```

Las diferencias entre los dos programas núcleo emanan de dos fuentes: CAOS2 tiene dos variables que iterar, en lugar de una; por otra parte, el sistema descrito por la transformación de Hénon es conservativo y no disipativo. La presencia de dos variables obliga a utilizar una variable provisional xx para el valor de x recién calculado, en tanto haya de seguir utilizándose en la segunda ecuación el valor actual de x. Al ser conservativo, el sistema dinámico subyacente a la transformación permite eliminar el primer bucle, encargado de la supresión de transitorios. No hay pérdidas de energía debidas a rozamiento o a otras fugas disipativas. Consiguientemente, no existen atractores propiamente dichos. Se podría afirmar, no obstante, que cada órbita computada por el sistema es atractora de sí misma. En todo caso, en la transformación de Hénon se encuentra ciertamente presente la extrañeza (y el caos). Finalmente, para cada valor al que se ajuste el parámetro a, el sistema resultante tiene una multitud de órbitas, y por las propiedades de conservación, cualquier par inicial de valores x e y representará un punto que se encuentra ya en una de las órbitas; la atracción se produce al instante, por así decirlo. Por estas razones, el núcleo de CAOS2 no utiliza valores iniciales estándar para sus variables de iteración, sino que tales valores tiene que aportarlos el programador.

Para dejar rematado el programa CAOS2 basta anteponer a su núcleo un enunciado de introducción de datos que permita al programador seleccionar el valor de a. Lo mismo que en CAOS1, cada valor de a conduce a un nuevo sistema; pero dado que el sistema es bidimensional, con sólo una muestra de las representaciones de los puntos de una órbita quedaría agotado todo el espacio disponible; no puede variarse a sistemáticamente sin invocar un caos de naturaleza no deseada.

Por tanto, el usuario de CAOS2 especifica una órbita inicial dando las coordenadas de uno de los puntos situados en la misma. Retrepándose en su asiento, observa fascinado cómo va trazándose la órbita. Podría ésta ser curva (pero no trazada de modo continuo, sino intermitentemente) o podría resultar algo bastante más extraño. Por ejemplo, la figura 3 exhibe una sucesión de 38 órbitas de una transformación de Hénon en la que el valor de a se ha ajustado a 1,111. Yendo desde el centro de la representación hacia la periferia vemos que las órbitas forman una sucesión de curvas cerradas, hasta que súbitamente aparecen diminutos "islotes", órbitas individuales intercaladas en la serie de órbitas concéntricas mayores. Al proseguir hacia el exterior persisten las órbitas concéntricas hasta la arremetida del caos y su inmediata implantación. En los confines exteriores de la porción de espacio de fases representado aparecen archipiélagos de islotes aleatoriamente salpicados de puntos, que denotan la aparición del caos. Vemos ampliada una de las áreas caóticas (recuadrada en color). Se previene a los lectores ansiosos por ampliar diagramas de Hénon de que deben utilizar la máxima precisión aritmética de que dispongan sus máquinas.

Como ya he mencionado, las transformaciones de Hénon representan una gran variedad de sistemas conservativos, entre ellos, el de los asteroides que orbitan en torno al Sol. Desafortunadamente, las órbitas que nos muestran los diagramas no son las descritas por los asteroides, sino representaciones de dichas órbitas en el espacio de fases. En el diagrama recién descrito el eje horizontal puede representar la posición de un asteroide expresada como distancia al Sol; en el eje vertical tendríamos la velocidad radial, es decir, la tasa de variación de la distancia al Sol en función del tiempo. Cada punto de la órbita computada por la transformación de Hénon representa la distancia radial y la velocidad radial de un as-

teroide situado en una posición angular específica con relación al Sol, esto es, los valores de dichas magnitudes cuando el asteroide atraviesa un plano vertical que subtiende dicho ángulo con el Sol. Los sucesivos puntos calculados por la transformación representan las sucesivas reapariciones del asteroide en dicho plano. Los islotes antes mencionados corresponden a bandas de resonancia debidas a perturbaciones provocadas en la órbita del asteroide por cuerpos del sistema solar mucho mayores, como el planeta Júpiter. En las regiones caóticas, la posición radial y la velocidad del asteroide variarán de forma esencialmente aleatoria cada vez que éste vuelva a pasar por el plano especificado. Su movimiento resulta impredecible. Puede ocurrir cualquier cosa.

Habida cuenta de sus aspectos estéticos, vale la pena echar una ojeada a otras gráficas generadas por transformaciones de Hénon. Dejando de lado toda interpretación física, hay en ellas una cualidad caprichosa, antojadiza y extraña, como vemos en la figura 4, reminiscente de raras criaturas acuáticas.

A los lectores interesados en las transformaciones de Hénon les encantará el número de diciembre de 1986 de la revista *Byte*. En él, Gordon Hughes, profesor de matemáticas de la Universidad estatal de California, describe de forma cautivadora algunas de las nociones físicas y matemáticas concernientes a las transformaciones de Hénon. Se presentan igualmente listados de programas redactados en PASCAL.

Un lector holandés, Peter de Jong, de Leiden, ha propuesto ya algunas otras fórmulas de iteración, capaces de generar imágenes y formas curiosas o extravagantes. De Jong recomienda iteraciones dependientes de cuatro parámetros, $x \leftarrow \mathrm{sen}(ay) - \cos(bx)$ e $y \leftarrow sen(cx) - (dy)$. Comencemos haciendo x e y ambos iguales a 0. Seguidamente, para lograr la figura que De Jong llama "patas de gallina", se ensayan los valores $a = 2{,}01$, $b = -2{,}53$, $c = 1{,}61$ y $d = -0{,}33$. Tomando respectivamente los valores $-2{,}7$, $-0{,}09$, $-0{,}86$ y $-2{,}2$ se obtiene un "lanzador de puntos", mientras que los valores $-2{,}24$, $0{,}43$, $-0{,}65$ y $-2{,}43$ producen un "huevo de Pascua que se autodecora".

Los lectores tienen libertad, lo mismo que De Jong, para inventar sus propias fórmulas de iteración y experimentar con ellas. Quienes den con formas de caos especialmente atractivas (o desconcertantes) quedan invitados por la presente a enviármelas por intermedio de la revista. Crutchfield ha tenido la bondad de acceder a mantener directamente correspondencia con todos aquellos lectores cuyo desconcierto no es verosímil que yo pueda satisfacer. Pueden escribirle al Department of Physics, University of California, Berkeley, California 94720, Estados Unidos.

A no dudar, los lectores con mentalidad "de vía única" habrán resuelto ya el problema del mes pasado, que pedía intercambiar la posición de dos vagones haciéndoles atravesar un puente débil. Los vagones se encuentran en un anillo y una locomotora ocupa un ramal conectado por un cambio de agujas. El puente tiene la resistencia suficiente para permitir el paso de un vagón, pero no el de la locomotora. ¿Cómo logrará la máquina intercambiar la posición de los vagones?

La máquina entra en el anillo, se dirige al coche A y lo empuja hasta dejarlo sobre el puente. Seguidamente retrocede hasta el vagón B, lo engancha, lo empuja hasta el extremo del puente y engancha B con A. Tira entonces de vuelta con ambos vagones hasta las agujas, y mete marcha atrás el vagón A en el tramo recto, donde lo desengancha. A continuación, la máquina lleva de regreso el vagón B hasta el puente, dejándolo allí desenganchado. Finalmente, la máquina circunda el circuito, saca a B del puente, lo deja en su nueva posición y vuelve por A.

En el artículo de junio, dedicado a la música por ordenador, dejé al cuidado de los lectores que meditasen sobre cómo obtener largas series no repetitivas de notas, seleccionando números módulo m. El método de selección consistía en comenzar por una "semilla" (un número inicial) e ir reiteradamente multiplicando por un número a, sumar otro número b y reducir el resultado tomando el resto de la división entre un número m. La secuencia tendrá longitud máxima cuando los números a y m sean primos entre sí (es decir, no tengan divisores comunes distintos de 1). La música que produzcan será, igualmente, la más extraña.

Me hace saber Peter de Jong que ha creado música extraña valiéndose del caos. Los lectores pueden crear sonidos similares convirtiendo los números generados por CAOS1 en notas musicales. En el exterior de las zonas caóticas tendremos frases musicales simples y repetitivas; dentro de ellas hallaremos los mismísimos sonidos del caos.

Taller y laboratorio

Por qué un fluido acelera su curso por el interior de un tubo pinzado

Jearl Walker

A veces, cuando riego el césped de mi jardín con una manguera, obstruyo parcialmente la boca de ésta para conseguir que el agua llegue más lejos. Esa acción aumenta la velocidad del agua, obligándola a pasar por una abertura más estrecha.

¿Aumenta esa obstrucción parcial el volumen de agua que mana de la manguera por unidad de tiempo? No. De hecho el caudal (así se llama) disminuye, ya que, con el dedo, creo una turbulencia que disipa parte de la energía de la corriente. Al estrechar aún más la abertura, podría incrementarse todavía más la velocidad del agua, pero disminuiría también el caudal. Estos hechos son práctica muy común en los laboratorios. Cuando se desea disminuir el caudal de agua o de otro líquido procedente de un tubo, se ciñe éste con una pinza o abrazadera para estrechar el espacio que debe atravesar el líquido. El resultado ya es algo previsto por el personal de laboratorio.

Pero recientemente, Werner J. Gatzek, médico de Waynesboro, en Virginia, me ha sorprendido con una experiencia relacionada con el tema que ha hecho tambalear mi seguridad. Intentaba construir un modelo del comportamiento del flujo líquido a través del riñón humano, ya que algunas propiedades de tal flujo tenían desorientados a los investigadores médicos. En el experimento, el agua fluía a través de una manguera de jardinería procedente de un depósito elevado que se mantenía siempre lleno. El extremo inferior de la manguera estaba conectado a un tubo de caucho que, en su curso, incluía un bucle que simulaba la disposición de los vasos de entrada y salida del riñón. El bucle se mantenía en posición merced a un pequeño corsé compuesto de tres trozos cortados del extremo del tubo; Gatzek forzó a éste a pasar por el interior de los tramos del corsé, ensanchándolos con dos alicates. En el extremo libre del tubo, había colocada una pinza de tornillo, con la misión de simular la resistencia variable que sufre el vaso de salida del riñón. Todo el tubo yacía horizontal sobre un banco de trabajo, por lo que, en toda su longitud, no había variaciones de altura que pudieran afectar a la corriente.

El caudal que atravesaba el sistema lo medía Gatzek recogiendo agua en un pequeño recipiente, a intervalos de tiempo precisos, y pesándola luego en una balanza dietética. Inicialmente, la corriente era un hilillo, a causa del estrechamiento que introducía el corsé. A la vez que siguió midiendo el caudal, fue apretando gradualmente la pinza, girando repetidamente el tornillo en un ángulo igual. Al principio, el caudal permaneció constante. Pero luego, cuando el tubo se estrechó bastante, el caudal creció brusca y espectacularmente. Alcanzó, por fin, un valor superior en cinco veces al que tenía cuando la pinza estaba totalmente abierta. Al seguir apretando la pinza menguaba el caudal, anulándose cuando la pinza se cerraba del todo.

¿Por qué al cerrar la pinza aumentaba el caudal? No hay duda de que al apretar la pinza se introduce una turbulencia, con lo que se reducen la energía de la corriente y su caudal. Sin embargo, el caudal aumentaba al angostar la corriente.

Una vez cerrada completamente la pinza, comenzó a abrirla a incrementos determinados, comprobando de nuevo los caudales. En tal ocasión, para conseguir el máximo caudal, era necesaria una mayor abertura de la pinza, siendo ese máximo mayor que el que se conseguía antes, es decir, cerrando el paso del líquido. Llegado al máximo, el caudal decrecía repentinamente al abrir más la pinza, hasta convertirse nuevamente en un hilillo. Cuando Gatzek representó gráficamente estas medidas del caudal en función de la abertura de la pinza, la curva reveló la existencia de una histéresis (un retardo) en el proceso. ¿Por qué el sistema exhibía un comportamiento distinto cuando se cerraba la pinza?

Los pormenores del experimento de nuestro autor no ofrecían una solución sencilla al misterio. El depósito del agua se encontraba a 5,2 metros por encima del banco de trabajo. El tubo, de caucho de látex ambarino, era de pared delgada y tenía un diámetro exterior de cinco milímetros. (Las características del tubo no son decisivas, pero la pared sí ha de ser delgada y dilatable.) El bucle tenía 22 centímetros de longitud y las porciones de tubo que le servían de entrada y salida medían, respectivamente, nueve y diez centímetros de largo. Las tres secciones del corsé presentaban una anchura de un milímetro cada una.

Para medir el caudal, Gatzek recogía muestras de agua cada 30 segundos. Tras pesar cada muestra en una balanza, convertía la lectura en mililitros y calculaba así el caudal. (Podría haber medido también el tiempo que tardaba la corriente en llenar un recipiente graduado en mililitros.) Entre medidas, giraba el tornillo de la pinza en cinco grados. El tubo no mostró señales de fatiga bajo la presión del agua.

Otro ensayo complicó el enigma. Al retirar la pinza y elevar gradualmente la altura del depósito, el caudal empezó, tal como señala la intuición, a aumentar; pero, cuando el depósito pasaba de cierta altura, el caudal permanecía invariable al aumentar ésta, o disminuía hasta en un 30 por ciento. Al seguir elevando el depósito por encima de esa zona, Gatzek observó que el caudal comenzaba de nuevo a crecer.

En un comienzo realizaba sus experimentos con una bomba rotatoria que lanzaba el agua a borbotones a través del tubo arrollado en un bucle y pinzado. Pensó entonces que la naturaleza pulsátil de la corriente podría justificar sus desconcertantes propiedades. Sin embargo, en 1986, Steven C. Wells, alumno por entonces de la universidad virginiana de Old Dominion, descubrió que la paradoja podía manifestarse en una corriente estacionaria. Desde entonces, Gatzek emplea un depósito elevado en vez de la bomba.

En el experimento en que se aprieta la pinza, Gatzek opina que el repentino aumento del caudal débese a una pugna por el espacio en el corsé. El trozo del tubo de entrada comprendido en el corsé se halla bajo la presión del agua. Cuando la pinza se abre, la presión provoca que ese tramo de tubo se hinche y oprima el tramo adyacente del tubo de salida, también dentro del corsé, reduciendo a un hilillo la corriente que atraviesa dicha parte del tubo de salida.

Cuando la pinza se cierra gradualmente, el estrechamiento introduce una resistencia al flujo, aumentando la presión en la zona comprendida entre

el corsé y la pinza y en el tubo de salida interior al corsé. Finalmente, la presión en el tubo de salida crece lo bastante para contrarrestar la que ejerce el tubo de entrada, y el primero se dilata dentro del corsé. Pese a que esta dilatación se produce a expensas del tubo de entrada, el resultado es un caudal mucho mayor. Cuando se alcanza el caudal máximo, al apretar más la pinza se crea una resistencia tal que el flujo decrece gradualmente hasta cesar.

Me planteé el problema centrándome en la energía. Me intrigó el hecho de que, pese a la certeza de que se eliminaba energía de la corriente al apretar la pinza, la verdad era que la corriente se tornaba más energética. Para avanzar conmigo en la resolución de esta paradoja, el lector debe conocer primero algunas de las características generales del movimiento del agua. El caudal que pasa por un tubo es igual al producto de la velocidad de la corriente por el área de la sección transversal del tubo. A lo largo de éste, el caudal debe permanecer constante, pues el agua no puede aparecer y desaparecer por arte de magia. Si el tubo se estrecha, el agua fluirá más de prisa; si se ensancha, el agua fluirá más despacio. Si el tubo mantiene una sección constante, la velocidad de la corriente no variará.

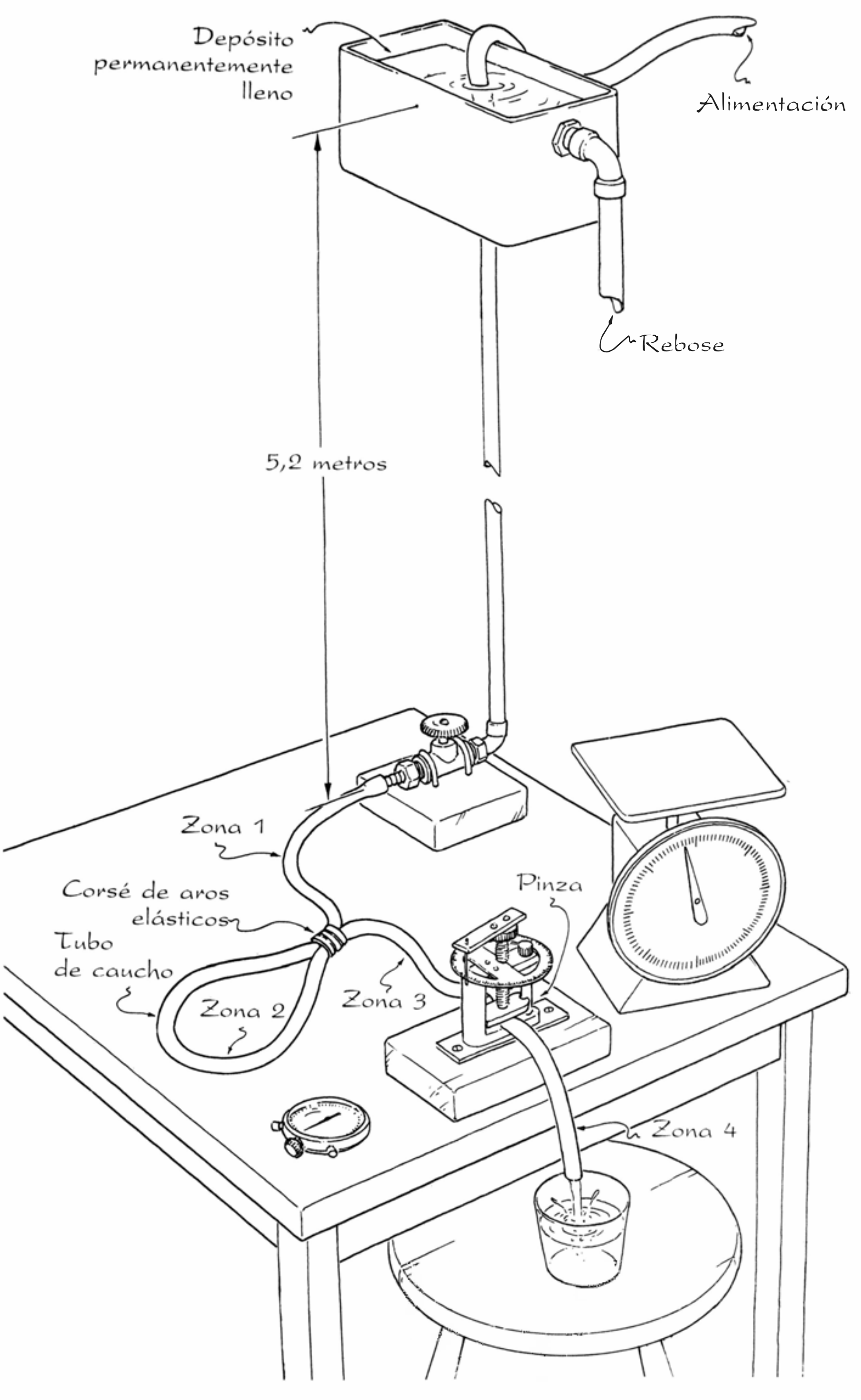
Cuando la corriente, o flujo, carece de turbulencias recibe el apelativo de laminar. En estos casos, la corriente puede seguirse mediante las líneas de corriente, que muestran cómo van avanzando las distintas secciones, o "partículas", de agua. Así, cada vez que una partícula pasa por un punto determinado del sistema, sigue, a partir de ese punto, el mismo trayecto que todas las que la precedieron en su curso por el mismo.

Una corriente de agua posee dos tipos de presión: estática y dinámica. La presión estática existe en toda conducción, aunque el agua esté inmóvil; sólo allí donde el agua esté en contacto directo con la atmósfera, como en la boca de una manguera, no habrá presión estática. La presión dinámica es proporcional al cuadrado de la velocidad de la corriente. Ambas presiones están relacionadas con la energía. La presión estática expresa la energía potencial por unidad de volumen; la presión dinámica es la energía cinética por unidad de volumen. Cuando la corriente presenta variaciones de altura, debe considerarse, asimismo, la energía potencial gravitatoria por unidad de volumen.

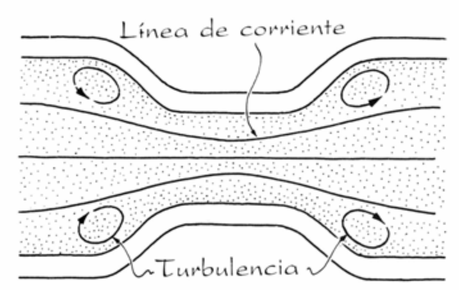
La ecuación de Bernouilli, así llamada en honor del matemático suizo del siglo XVIII Daniel Bernouilli, establece que, en un flujo laminar, la suma de tales energías debe permanecer constante a lo largo de toda línea de corriente. Supongamos que discurra agua por un tubo horizontal que presente un estrechamiento. Cuando el agua penetra en éste, su velocidad y energía cinética (la presión dinámica) aumentan porque la presión estática cede energía. Si el tubo recupera su anchura original, la presión estática recobra la energía. En todo momento, la suma de las presiones estática y dinámica permanece inalterada.

Supongamos que el tubo descienda sin cambios de sección. Conforme el agua fluye tubo abajo, la energía potencial gravitatoria se transforma en presión estática y tampoco aquí varía la suma de las energías.

La ecuación de Bernouilli y la condición de que el caudal se mantenga constante en el sistema no bastan para explicar el experimento de Gatzek. Si el flujo fuera laminar, el caudal que pasa por el corsé sería el mismo que si no hubiera corsé. El hecho de que la corriente sea sólo un hilillo indica que el corsé introduce turbulencia sufi-



1. Experimento de Werner J. Gatzek



2. *Turbulencia en un estrechamiento*

ciente para eliminar casi toda la energía de la corriente. En mi opinión, cuando se aprieta la pinza, el caudal aumenta porque la pérdida de energía dentro del tubo de salida interior al corsé se reduce considerablemente.

Para desarrollar mi hipótesis, comencé con un sistema sencillo de flujo laminar en el que el agua corría por un tubo horizontal de sección constante. Este tubo estaba unido cerca del fondo de un depósito que se mantenía lleno. Como el agua que manaba del tubo se hallaba directamente expuesto a la atmósfera, la presión estática en el extremo abierto debía ser nula. Además, por ser constante el radio del tubo, la velocidad de la corriente debía ser igual en toda su longitud. Por tanto, según la ecuación de Bernouilli, la presión estática debía ser nula en todos los puntos del tubo.

¿Qué ocurría en una partícula de agua situada en el recipiente y próxima al desagüe? La presión en el lado de salida del recipiente era inferior a la presión en el lado en el que el tubo se alejaba del desagüe. Así, la diferencia de presiones aceleraba la partícula a su paso por el desagüe, confiriéndole la velocidad que llevaba el resto del agua que fluía por el tubo.

Experimenté luego con un tubo de desagüe compuesto de un tramo vertical que ponía en conexión dos tramos horizontales. También en este caso, la presión estática del tramo horizontal final debía ser nula. Más aún, el flujo debía realizarse a velocidad constante, incluso en el tramo vertical, ya que el radio era constante. Lo que distinguía a este dispositivo del anterior era que, cuando el agua fluía por el tramo vertical, había una energía potencial gravitatoria que se convertía en estática. En la parte superior del tramo vertical, la presión estática era negativa.

¿Qué ocurría, de nuevo, en una partícula de agua a punto de entrar en el desagüe? La partícula sufría ahora una presión estática negativa en un lado, y, por tanto, su aceleración era mayor y penetraba en el desagüe a mayor velocidad que en el caso anterior. Con un flujo más rápido, el caudal era mayor.

Adviértase que la energía cinética y la velocidad del agua proceden de la presión estática y de la energía potencial gravitatoria del agua contenida en el recipiente. Supongamos que una angostura en el tramo horizontal final del tubo introduzca una turbulencia que elimine energía del flujo. Entonces, la energía cinética del agua que sale por el extremo del tubo será menor, reduciéndose la velocidad en el sistema. En el experimento de Gatzek, el corsé introduce dos angosturas y la pinza apretada da lugar a una tercera.

Para revisar el experimento de Gatzek, he trabajado con una representación esquemática del tubo que incluye dos trozos estrechos cortos y una pinza en el tramo final [*véase la figura 4*]. Las zonas estrechas representan los tubos de entrada y salida en el punto por el que atraviesan el corsé. La presión estática en el extremo abierto del tubo y en las zonas numeradas 3 y 4 es nula. En la zona 1, la presión estática es alta, aplastando la porción de salida del tubo del corsé y haciendo que por el sistema fluya sólo un hilillo. La zona 2 representa el bucle.

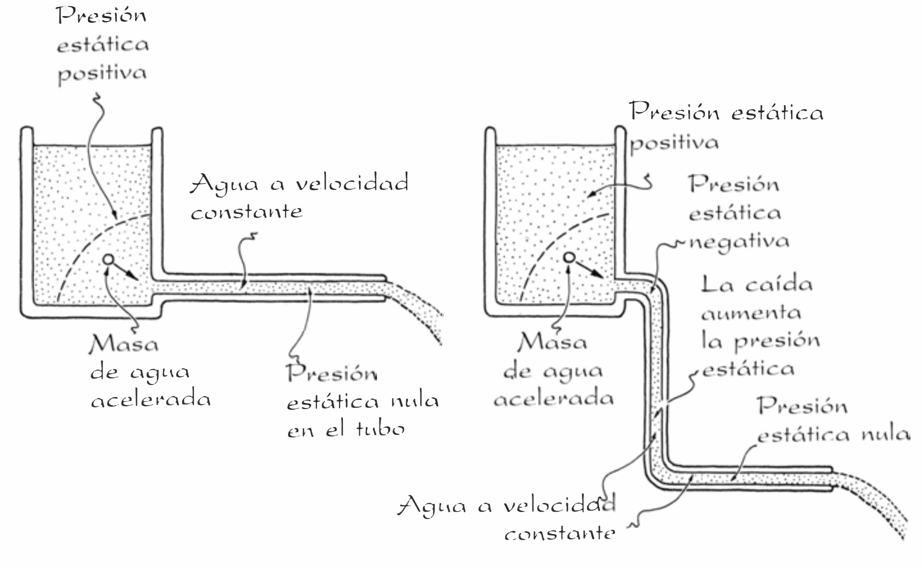
Examínese la gráfica que aparece debajo del esquema del tubo. La línea superior representa la suma de las presiones a lo largo de la longitud del tubo; la inmediata, la presión estática. La distancia entre estas dos líneas representa la presión dinámica, o energía cinética, de la corriente. Como la velocidad del agua es constante y pequeña, la distancia entre las líneas es también constante y pequeña.

En el tramo vertical del tubo, la presión estática aumenta a expensas de la energía potencial gravitatoria. En el gráfico, ambas líneas se elevan, sin que aumente la energía cinética de la corriente. Dentro del corsé, ambos tubos, el de entrada y el de salida, introducen turbulencias que eliminan energía, reduciendo la presión estática. Al ser el tubo de entrada bastante ancho, la pérdida de energía en él es pequeña. En el tubo de salida, parcialmente aplastado, la pérdida de energía es notablemente mayor, anulando la presión estática.

Dibujé a continuación un esquema y una gráfica que representaban el caudal máximo. En la zona 4, la presión estática seguía siendo nula. Como en esa zona la sección del tubo no varía, el hecho de que ahora el caudal sea mayor supone que la velocidad del agua lo será también. De aquí que las dos líneas de la gráfica estén más separadas que en el caso anterior.

Obsérvense las pérdidas de energía en la entrada y salida simuladas del corsé. Aunque en la entrada la pérdida es algo mayor que antes, en la salida se reduce en cuantía apreciable, debido al aumento del diámetro del tubo de salida dentro del corsé. La pérdida combinada de energía en el corsé y en la pinza es menor que cuando ésta se hallaba abierta del todo. Esta menor pérdida se manifiesta como una energía cinética adicional en la corriente.

¿Cuándo deja el corsé pasar el caudal máximo? Gatzek sugirió que eso ocurre cuando los tubos de entrada y salida tienen el mismo diámetro dentro del corsé. Para comprobar su sospecha, admití la hipótesis de que la pérdida de energía producida por un estrechamiento era proporcional al cociente entre el área de la sección transversal normal del tubo y la del estrechamiento. Agregué luego las pérdidas en los puntos de entrada y salida del corsé, con la condición de que la suma de las áreas



3. *Dos formas de desagüe*

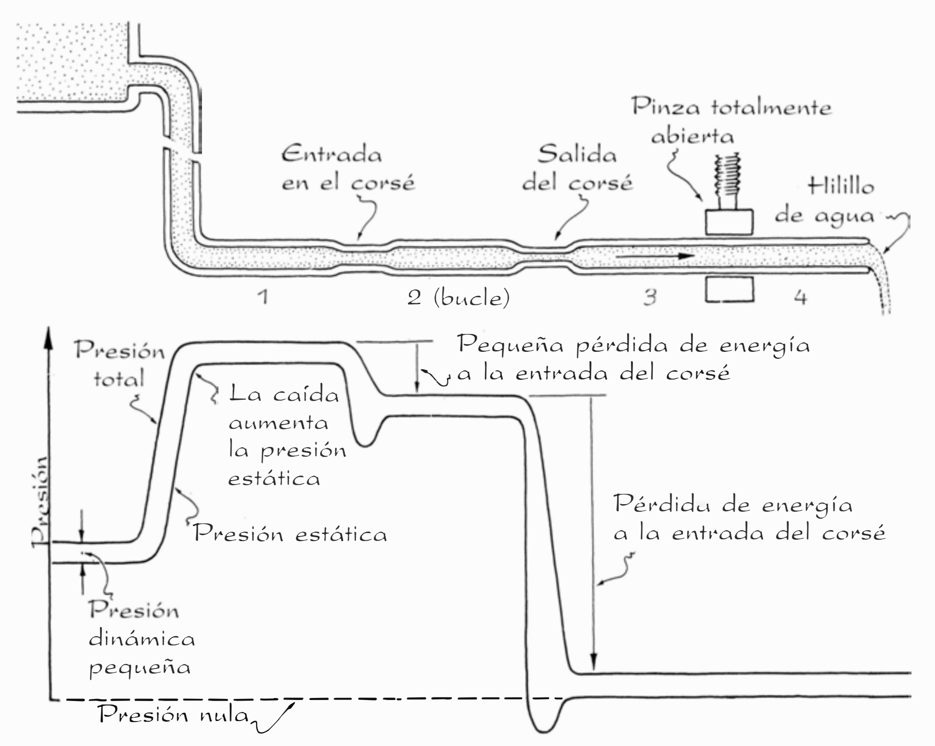
de los tubos estrechados tenía que ser el área de la sección transversal del corsé. Lo comprobé para el caso en que la pérdida combinada era la mínima. En efecto, resultó que la pérdida combinada era mínima cuando los diámetros de los tubos de entrada y salida dentro del corsé eran iguales. Quedaba así resuelto parte del misterio. Cuando se aprieta la pinza, el aumento de presión estática en el tubo de salida dentro del corsé ensancha dicho tubo, reduciendo mucho la pérdida de presión ahí y permitiendo que una mayor proporción de la energía de la corriente acabe en forma de energía cinética.

¿Por qué es repentina la transición al régimen de caudal máximo? Mi opinión es que ello se debe a la forma de las paredes donde los tubos de entrada y salida entran en contacto con el corsé. Cuando se aprieta la pinza, la pared del tubo de entrada es convexa y, cóncava, la del tubo de salida; éste queda entonces en desventaja. Si en este tubo crece la presión, llega un momento en que la misma logra vencer la concavidad de la pared, con lo que ésta se dobla hacia afuera. Las paredes de los tubos de entrada y salida quedan entonces planas, una contra otra, y el caudal aumenta bruscamente hasta su valor máximo.

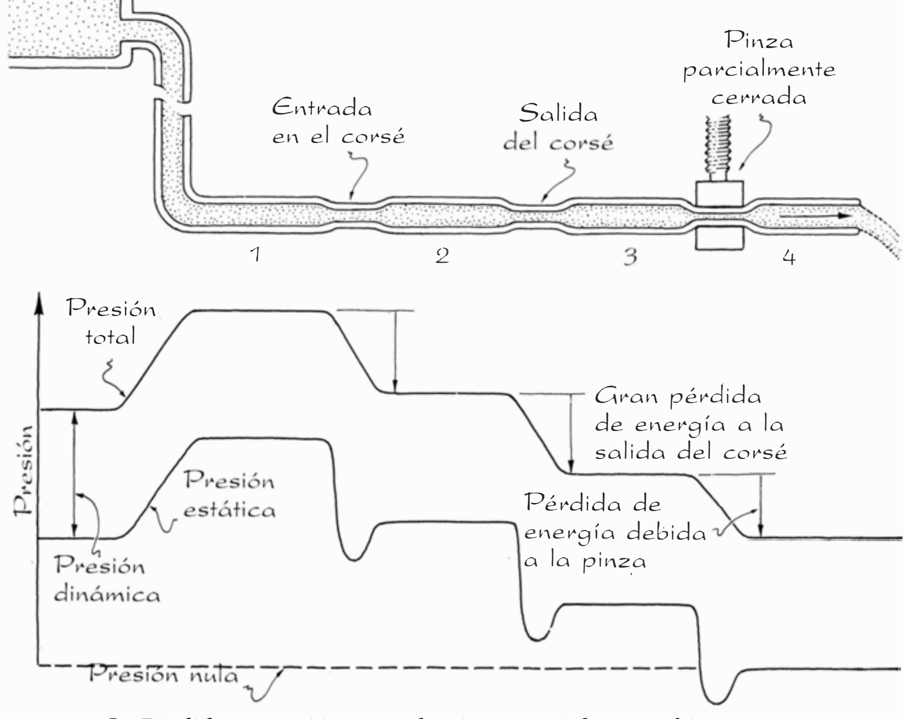
¿A qué se debe la histéresis que exhibe el sistema? Supongamos que la pinza se haya apretado hasta el punto en que el caudal sea máximo. Como en tal situación las paredes de los tubos de entrada y salida están planas una contra otra, la pérdida de energía en el corsé es mínima, o casi mínima. Si la pinza se abre un poco, las paredes de los tubos de entrada y salida siguen planas y la pérdida de energía en el corsé no varía. Pero como la pérdida de energía en la pinza se reduce, la pérdida combinada en el sistema mengua también. Por esa razón, hay más energía del flujo en forma cinética y el caudal tiene un valor máximo mayor.

Aún nos queda una pieza del rompecabezas. ¿Cómo explicar el comportamiento del caudal cuando la pinza se deja abierta y el depósito se eleva gradualmente? La explicación de Gatzek nos sirve perfectamente. Al principio, el caudal aumenta porque la mayor altura del depósito impulsa con más rapidez el agua por el sistema. No obstante, el aumento de presión en el tubo de entrada del corsé no tarda en comenzar a aplastar al tubo de salida. En cuanto el depósito se eleva por encima de cierta altura, el aplastamiento en cuestión provoca que el caudal se mantenga constante o disminuya. Si el depósito se eleva aún más, el caudal comienza a aumentar otra vez porque la alta presión dentro del tubo de entrada dilata el corsé.

Los experimentos de Gatzek pueden ayudar a explicar determinadas propiedades del flujo que atraviesa el glomérulo del riñón. Ocurre que el vaso aferente (arteriola de entrada) y el vaso eferente (arteriola de salida) pasan por la misma abertura de la cápsula de Bowman y tal vez pugnan en ella por el espacio. El vaso eferente carece de pinza, pero está sometido a una hormona vasoconstrictora llamada angiotensina, derivada de la renina que produce el riñón. Es posible que el riñón, en algunas situaciones fisiológicas, produzca angiotensina para constreñir el vaso eferente, aumentando la resistencia de éste al flujo. Dicho aumento de resistencia puede ensanchar entonces el vaso en la abertura de la cápsula de Bowman, con el consiguiente aumento del caudal.



4. Pérdidas energéticas con la pinza abierta



5. Pérdidas energéticas con la pinza parcialmente abierta

Libros

Hormonas, fraudes en la ciencia, fármacos y cartografía automática

F. García Valdecasas, L. Alonso, J. Comelles y J. M. Terradas

HORMONAS. LOS MENSAJEROS DE LA VIDA, por Lawrence Crapo. Editorial Labor; Barcelona, 1987. La ciencia es una aventura apasionante. Penetrar en el conocimiento de cualquiera de sus grandes ramas fascina. Ya sea en la inconmensurable magnitud del universo o, en el extremo opuesto, en la fabulosa complejidad del mundo subatómico o, y casi en más alto grado, en el gran misterio de la vida, con sus finas regulaciones y mecanismos que desafían el ingenio más aguzado. La presentación de la aventura científica en forma novelada es una tentación constante que se desvaría en los libros de ciencia-ficción, tanto más desalentadores cuanto mayor quiere ser el ingenio del novelista. A la gran aventura de la ciencia no le hacen falta artificiales adornos. Le basta con su escueta realidad. Y cuanto más real, más asombrosa. Sobre todo si seguimos paso a paso el trabajoso camino que condujo a los grandes descubrimientos. Hace ya muchos años, en la década de los veinte, tuvo un éxito resonante un libro que presentaba novelado un capítulo de la aventura científica. Nos referimos a *Los cazadores de microbios*, de Paul de Kruif. Este libro fue seguido por otros muchos y aún hubo una época hacia los años cincuenta en la que las obras noveladas, en especial en el campo de la prehistoria y la arqueología, tuvieron extraordinario auge.

El libro que hoy consideramos de Lawrence Crapo puede inscribirse en este género literario. Los asombrosos descubrimientos realizados en la regulación humoral de las funciones orgánicas de los animales, y por lo tanto del hombre, es decir en la endocrinología, en los últimos cien años es un campo propicio. El nacimiento de la teoría de las secreciones internas a partir de los experimentos de Claude Bernard sobre la glicemia, la famosa *picadura diabética*, y el papel del hígado en su regulación. La tensión vivida por los investigadores a lo largo de tantos años de experimentos en los que se aportaban más y más datos a favor de la teoría. El experimento crucial de Bayliss y Starling descubriendo la "secretina" que dio lugar a la acuñación del término "hormona", hoy tan popular, lo transcribe con palabras de un testigo presencial. El lector va siguiendo página a página una historia emocionante de avances en terrenos desconocidos y de utilización de nuevas tecnologías, hasta llegar al último capítulo, en el que se aborda la encrucijada de los mensajeros hormonales con los transmisores nerviosos y las funciones cerebrales.

Especial dramatismo tiene la historia de la porfía por encontrar los agentes hipotalámicos, llamados inicialmente "factores liberadores". Estas auténticas hormonas rigen la actividad de la glándula que lleva la batuta de la gran orquesta funcional del organismo. Algo así como un director de escena en la sombra. Su interés funcional era extraordinario, pero las dificultades de su aislamiento, incluso de demostrar que existían, eran no menos extraordinarias. Piénsese en la pequeñez del hipotálamo y en la débil concentración en que los supuestos "factores" se encontraban. Hubo que reunir los órganos de ¡un millón de animales! El desaliento de los investigadores surgía con frecuencia y el mundo científico dudaba de su realidad. Ello suponía el fracaso y el descrédito, algo temible para los estudiosos. Pero el suspense de años tendría un final feliz y el premio Nobel sería la recompensa...

El libro que comentamos es lo suficientemente científico para que interese a un público experto en la materia y lo suficientemente ameno para que alcance el favor del gran público que, sin duda, se sentirá atraído por la aventura científica que late en todas sus páginas.

Traducción y presentación son dignas de alabanza. Lástima que se hayan deslizado algunas erratas, como la cometida en la pág. 26 en la fórmula química de las hormonas esteroideas, o la cometida en la pág. 164 en la fórmula de la morfina, cuando está correcta la que figura en la pág. 162 de la misma sustancia. También en la pág. 47, en la fórmula de ejemplo de tripéptido, está desplazado el radical R_2 de su lugar correcto. Son detalles que, aun de poca monta, deslucen una obrita por lo demás excelentemente presentada. (F. G. V.)

FALSE PROPHETS. FRAUD AND ERROR IN SCIENCE AND MEDICINE, por Alexander Kohn. Basil Blackwell; Oxford, 1986. Ha sido necesario que en los últimos años se develaran fraudes y trampas en el mundo de la investigación científica para que se pusiera sobre el tapete algo que *sotto voce* se venía oyendo en no pocos laboratorios: se publica demasiado, sin control, sin tiempo para la verificación o repetición de los ensayos; se plagia, se fusila; se silencia, se arrogan injustas prioridades; se firman colaboraciones en las que no se ha intervenido; se priman los originales de determinados centros, y mil miserias más del mundo, humano al cabo, de la ciencia.

No se trata ya de la vergonzante trapacería del doctorando que redondea los datos para defender la tesis, o del director de ésta que los aprovecha para su lucimiento personal. Ante la imperiosa necesidad de abultar el expediente académico para asegurarse una plaza, como sea y donde sea, la investigación, o mejor, la publicación científica estaba tomando unos derroteros que podían afectar a la salud pública –en el campo de los fármacos–, e incluso los principios de algunas disciplinas –en genética, por ejemplo, herencia de determinados caracteres–. Parece que el aldabonazo se ha oído y varias revistas comienzan ya a rechazar expresiones como "por primera vez" y empieza a aceptarse que cien trabajos mediocres no valen lo que uno bueno, aunque determinados baremos minis-

teriales los puntúen por igual a la hora de conceder becas o prebendas.

Kohn ha acertado plenamente en la oportunidad de su título y en la redacción de la obra, que se lee de un tirón. Fraudes del pasado y de ayer mismo se entreveran para conferirle mayor viveza si cabe. Distingue entre lo que es mera ilusión –ver cosas que no existen–, "apaño" y falsedad nuda. Con ejemplos más o menos familiares a cualquier iniciado en la historiografía aborda los aspectos éticos inseparables del quehacer científico y los intereses de la política, con el caso arquetípico de Lysenko.

La sociología de la ciencia tiene mucho que ver con la aceptación de determinados fraudes. Recuérdese, por ejemplo, que tras el descubrimiento, en 1895, de los rayos X por W. K. Röntgen, se sucedieron los de distintas emisiones radiactivas: rayos alfa, rayos beta y ragos gamma. ¿Por qué no también los rayos N, de René Blondlot? En España hubo quien los vio: "La pantalla que tengo el gusto de presentaros, recibida hace unos dos meses, para la investigación de los rayos obscuros N y N_1, ha sido preparada bajo la dirección de Mr. Blondlot, *correspondant de l'Institut* de Francia e inventor de estos rayos... Los que han experimentado con la pantalla de sulfuro de calcio fosforescente de superficie uniforme, y se han convencido de la dificultad de ver bien el aumento de luz que producen los rayos N, comprenderán mi entusiasmo por la pantalla Blondlot, con la cual es posible distinguir bien estos cambios de intensidad. Si algunos de los que han hecho experimentos sobre los rayos N hubiesen tenido esta pantalla y hubiesen sabido usarla, no se hubieran burlado de estos rayos." (Guillermo J. de Guillén García, *Memorias de la Real Academia de Ciencias y Artes de Barcelona*, tercera época, volumen V, número 14, pág. 209, 1905.)

Si algo esperaba con ahínco el evolucionismo ingenuo de las primeras décadas de siglo era el "eslabón perdido" entre el primate y el hombre. Charles Dawson lo "encontró" en un yacimiento de Sussex Ouse. El hombre de Piltdown, o *Eoanthropus dawsoni*, se "desintegró" ante el análisis, en 1953, del contenido en flúor del hueso, pintura y radiactividad. Pero habían transcurrido cuarenta años largos antes de que a J. S. Weiner le asaltara la sospecha al caer en la cuenta de la falta de coplanaridad en el desgaste de los molares.

Kohn podía haber extendido su inquisición a la propia historia de la ciencia. Y preguntarse por el falso develador de los falsos profetas. Me refiero a la frecuente propalación de afirmaciones gratuitas sobre lo que realizó X o pensó Y sin haber leído o comprobado el dicterio, práctica hoy difundida como una peste en nuestro país, hasta el extremo de que, en una documentada obra sobre *La teoría celular*, se ve obligado A. Albarracín, su autor, a escribir: "Estimo, en fin, que la utilización de las referencias bibliográficas –muy cuidadosamente contrastadas–..." (p. 13). No faltaba más.

Evidentemente, algunos fraudes que la historia aquí contada recoge no serían posibles hoy. Hay otros más sutiles que se zafan en las cantidades ingentes de datos que manipulan los ordenadores. Pero esa falta de seguridad constituye, paradójicamente, el acicate de la ciencia: la postura escéptica y dubitativa de sus cultivadores. (L. A.)

DROGAS Y TERAPIA, por A. K. Swonger y L. L. Constantine. Editorial Alhambra; Madrid, 1985. La psicofarmacología es probablemente uno de los campos de las ciencias de la conducta y de la salud peor conocido por los profesionales. La intención de este libro es la de ofrecer un manual sobre el mismo enfocado hacia los profesionales no médicos: enfermeras y ATS, asistentes sociales, educadores, terapeutas de la familia, sociólogos y antropólogos de la medicina, profesionales de la salud mental que tienen que contar con los psicofármacos en su práctica diaria y carecen de formación suficiente para evaluar sus efectos y sus influencias.

Algunas razones explican esa falta de formación. En el caso de los médicos y de las enfermeras y ATS, la escasa importancia atribuida durante la carrera a la preparación en psiquiatría, psicología clínica y psicofarmacología. Ello responde a una vieja tradición de la universidad española, donde psiquiatría y psicología fueron cenicientas que llegaron tarde y han sido más disciplinas "de relleno" que campos fundamentales en el ejercicio profesional hospitalario o en la atención primaria.

El médico general divide los psicofármacos entre "menores" y "mayores". Son los primeros los "tranquilizantes y antidepresivos", que pueden emplearse sin excesivo control porque son productos "seguros", a caballo entre el placebo y la complacencia, para resolver los problemas "menores", esencialmente psicofuncionales que lle-

nan las consultas de asistencia primaria. El resto de los psicofármacos son productos "mayores", usados sobre todo en los manicomios, y de los cuales únicamente hay que retener los viejos "cócteles líticos" que han servido tantas veces para yugular crisis de agitación.

Ha penetrado también en el tejido social una división dual de los psicofármacos: los "inocuos", esencialmente las benzodiacepinas de baja dosificación y bastantes antidepresivos tri- o tetracíclicos con efectos ansiolíticos (amitriptilina, maprotilina), que se emplean en dosis no terapéuticas sino de mero placebo, y los productos "duros", que producen efectos secundarios y se asocian al tratamiento de enfermos. El mal uso de estos preparados ha favorecido el que profesionales de la salud y la mayoría de la población liguen los psicofármacos a la sedación, inducción del sueño y tranquilizadores de la agitación; en resumen, productos que terminarán con los estados y crisis de agitación y con los desórdenes psicofuncionales.

A lo largo de los últimos veinte años, se ha sumado a este desconocimiento general de los psicofármacos la introducción poco crítica de la literatura antiinstitucional en psiquiatría y asistencia social. Se ha creado una "frontera" artificial que separa al profesional "organicista", "biologicista" y por tanto "de derechas", del profesional imbuido de doctrina "comunitaria", "socializadora" y "de izquierdas"; para aquel bando, desde la perspectiva de éste, los psicofármacos constituirían la panacea de multitud de trastornos, cuando se aplican en dosis terapéuticas "duras"; para los segundos, los psicofármacos vendrían a ser "camisa de fuerza química" con la que el poder aherroja a sus súbditos.

El libro de Swonger y Constantine se dirige a profesionales no expertos en bioquímica y comprometidos en la labor asistencial psiquiátrica, cuya función terapéutica nadie cuestiona... en su país. Consta de tres grandes apartados. El primero se analiza el contexto social, psicológico y cultural en el que se inserta el uso de psicofármacos en la terapéutica de los trastornos psicopatológicos. En el segundo bloque, que corresponde a la segunda y tercera partes, se exponen los principios básicos de la neurofisiología y de la farmacología clínica, con especial atención al problema del abuso de drogas y medicamentos. El tercero acomete una revisión global de los fármacos que inter-

vienen en los trastornos psicopatológicos y los fármacos que modifican la función motora, actúan sobre el sistema extrapiramidal y sobre el dolor y la consciencia. Se expone siempre el mecanismo de acción de cada familia y su implicación en la dosificación y la administración. Todo ello ilustrado con claridad y auxiliado por breves síntesis bibliográficas que permiten el desarrollo posterior.

El libro adolece de algunos defectos: el principal, que los traductores no han adaptado los nombres de los preparados al registro español; en segundo lugar, el tiempo transcurrido entre la edición original (en 1976) y su traducción, sin haber incorporado avances posteriores en el terreno de los neurotransmisores.

Falta, por último, la inclusión de neurolépticos y antidepresivos aceptados en Europa, que, sin embargo, prohíbe la legislación norteamericana. (J. M. C.)

MAPA D'USOS DEL SÒL DE CATALUNYA 1:250.000. Generalitat de Catalunya. Barcelona, 1987. Sabido es que entre los primeros atisbos que tenemos de una nueva tecnología, casi siempre desarrollada desde luego en otros pagos, y su uso rutinario entre nosotros suele transcurrir un tiempo respetable. Sin embargo, a veces este proceso alcanza una lentitud verdaderamente exagerada. Esta ha sido al menos mi sensación personal en el campo, eternamente preñado de futuro, pero siempre harto escurridizo, de la percepción remota y las aplicaciones de los satélites artificiales al inventario de los recursos naturales, a la problemática ambiental y al estudio de procesos físicos en la superficie del planeta. Las primeras campanas anunciando la buena nueva de un arma poderosísima al servicio de los investigadores empezaron a sonar allá por los últimos años sesenta, y ya en 1971 tuve ocasión de participar en alguna reunión y proyecto relacionado con el tema. Desde entonces han transcurrido nada menos que dieciséis años, y en ese tiempo, dejando aparte algunos estudios locales traducidos en breves artículos especializados, y también algún ejemplo de proyecto de investigación que ha podido usar hasta cierto punto de la información de los Landsat, poco se ha podido concretar de las enormes expectativas que en aquellos tiempos se habían levantado.

Entre otras causas de tan módicos desarrollos se hallan la dificultad de disponer de material en forma de cintas en número y con la regularidad suficientes, así como los costes asociados a la adquisición de dicho material y a su tratamiento informático. Pese a las dificultades, sin embargo y por fortuna, no todos perdieron la paciencia.

En los últimos años se advierten ya síntomas claros de que la explotación de la percepción remota empieza a ser una realidad tangible en tareas orientadas a la gestión. Uno de los más claros lo constituye la publicación, por el Instituto Cartográfico de la Generalidad catalana (un organismo joven, nacido hace sólo cuatro años), en colaboración con la Dirección General de Política Territorial y con el Centro de Cálculo de la Universidad Politécnica de Cataluña, de un *Mapa d'Usos del Sòl de Catalunya 1:250.000* realizado con técnicas de percepción remota. El mapa parte de las imágenes de dos juegos de siete cintas, para dos épocas diferentes, captadas en 1981, y usa una representación en unidades discretas de 1 km^2, correspondientes al retículo UTM. A cada unidad se le atribuye el uso en ella dominante. El objetivo del mapa es servir para la planificación territorial.

El mapa es sólo un primer intento, que habrá de servir de base para posteriores aproximaciones cada vez más precisas. Contiene errores, desde luego, en la clasificación automática realizada. Los autores han contrastado los resultados de su programa, que produce una clasificación sencilla en sólo siete tipos (bosques, matorrales y pastos, secano, regadío, suelo urbanizado, agua y, finalmente, una categoría de no clasificado), con los de un sondeo sobre 291 unidades del retículo estudiadas mediante fotografías aéreas convencionales. Ello les ha permitido establecer los porcentajes de error cometidos, que son del orden del 5 %, una proporción muy razonable en cartografía automática que avala la bondad del método empleado. En el texto que acompaña al mapa se hace una discusión de las principales causas de error.

El valor esencial del mapa estriba, hoy por hoy, en el dominio de la metodología puesta en juego para su realización, que habrá de permitir sin duda, y a partir de ahora, un rápido progreso en la producción de mapas constantemente actualizados, con las correspondientes ventajas en el análisis de procesos dinámicos. Así han debido sin duda entenderlo los autores, que nos ofrecen además del mapa un excelente resumen sobre los datos de base, su tratamiento en la cartografía automática y el método empleado en este trabajo en concreto. Otro valor relevante del estudio es la clasificación obtenida de usos del suelo por comarcas. Puede verse en ella que, mientras la Garrotxa, con un 85,8 %, es la que cuenta con más unidades dominadas por bosques, seguida del Solsonés y La Selva, los dos Pallars son los que poseen mayor proporción de superficie dominada por monte bajo y pastos, Les Garrigues y el Urgell (0,8 y 1,5 %, respectivamente) son las más deforestadas, y el Segrià es la que cuenta con menor proporción de zonas poco artificializadas. Tales resultados son parecidos a los que se obtienen por otros métodos más tradicionales.

Algunos de los investigadores que han participado en la realización del mapa son antiguos veteranos del tema, que han sabido mantener, como antes señalábamos, su interés por él a pesar del tiempo y las decepciones cosechadas. Es el caso especialmente de Josep Maria Camarasa. A su tenacidad e inteligencia hay que atribuir este paso muy significativo hacia adelante en un campo que, por fin, empieza a entrar en una fase de aceleración hacia la órbita de la aplicación habitual. Lo que no significa que las dificultades hayan desaparecido completamente, ni mucho menos.

La mayor dificultad sigue siendo el coste muy elevado de las cintas de cada imagen correspondiente a 185 × 185 km. Ello limita aún muchas de las posibilidades teóricas. En cambio, las imágenes del actual satélite francés Spot tienen ya una resolución de 10-20 metros, frente a las antiguas imágenes de Landsat con 70-80 metros, y se puede disponer de varias bandas, entre ellas una en el infrarrojo térmico, lo que augura numerosas posibilidades en la investigación, siempre que para las necesidades de ésta no constituya un obstáculo el carácter un tanto aleatorio de la distribución temporal de las imágenes disponibles (o que se disponga de los recursos suficientes para adquirir las cintas adecuadas a los objetivos del proyecto, lo que en general resultará difícil).

En definitiva, aquella remota percepción de la percepción remota se va haciendo contacto y manejo. Las imágenes fascinantes e inútiles, casi gratuito arte tecnológico, devienen ya datos, porcentajes, resultados. Lógico es celebrarlo y esperar desde ahora un progreso cada vez más gratificante. (J. T.)

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

BASES DE LA NEUROGENESIS EN *DROSOPHILA MELANOGASTER*

MATERNAL EFFECTS OF ZYGOTIC MUTANTS AFFECTING EARLY NEUROGENESIS IN *DROSOPHILA*. F. Jiménez y J. A. Campos-Ortega en *W. Roux's Arch.*, vol. 191, págs. 191-201; 1982.

ON THE PHENOTYPE AND DEVELOPMENT OF MUTANTS OF EARLY NEUROGENESIS IN *DROSOPHILA MELANOGASTER*. R. Lehmann, F. Jiménez, U. Dietrich y J. A. Campos-Ortega en *W. Roux's Arch.*, vol. 192, págs. 62-74; 1983.

THE EMBRYONIC DEVELOPMENT OF *DROSOPHILA MELANOGASTER*. J. A. Campos-Ortega y V. Hartenstein. Springer-Verlag. Berlín, 1985.

GENETICS OF EARLY NEUROGENESIS IN *DROSOPHILA MELANOGASTER*. J. A. Campos-Ortega en *Trends Neurosci.*, vol. 8, págs. 245-250; 1985.

LINEAGE ANALYSIS OF TRANSPLANTED INDIVIDUAL CELLS IN EMBRYOS OF *DROSOPHILA MELANOGASTER*. COMMITMENT AND PROLIFERATIVE CAPABILITIES OF NEURAL AND EPIDERMAL PROGENITORS. G. M. Technau y J. A. Campos-Ortega en *W. Roux's Arch.*, vol. 195, págs. 445-454; 1986.

MOLECULAS DE EXCITACION VISUAL

CONTROL OF ROD DISK MEMBRANE PHOSPHODIESTERASE AND A MODEL FOR VISUAL TRANSDUCTION. P. A. Liebman y E. N. Pugh, Jr., en *Current Topics in Membranes and Transport*, vol. 15; 1981.

FLOW OF INFORMATION IN THE LIGHT-TRIGGERED CYCLIC NUCLEOTIDE CASCADE OF VISION. Bernard K.-K. Fung, James B. Hurley y Lubert Stryer en *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 78, n.º 1, págs. 152-156; enero de 1981.

MILLISECOND ACTIVATION OF TRANSDUCIN IN THE CYCLIC NUCLEOTIDE CASCADE OF VISION. T. M. Vuong, M. Chabre y L. Stryer en *Nature*, vol. 311, n.º 5987, págs. 659-661; 18 de octubre de 1981.

CYCLIC GMP CASCADE OF VISION. Lubert Stryer en *Annual Review of Neuroscience*, vol. 9; 1986.

LOS ANILLOS DE URANO

THE RINGS OF URANUS. J. L. Elliot y P. D. Nicholson en *Planetary Rings*, dirigido por Richard Greenberg y Andre Brahic. University of Arizona Press, 1984.

RINGED PLANETS: STILL MYSTERIOUS. Jeffrey N. Cuzzi en *Sky and Telescope*, vol. 68, n.º 6, págs. 511-515, diciembre, 1984; vol. 69, n.º 1, páginas 19-23, enero de 1985.

VOYAGER 2 MISSION TO URANUS. Reports en *Science*, vol. 233, n.º 4759; 4 de julio de 1986.

EL PERFUME

LE GRAND LIVRE DES PARFUMS. William Kaufman. Editions Vilo; 1974.

ANALYSE QUALITATIVE DE LA FRACTION ODORANTE DE LA MOUSSE DE CHÊNE. R. Ter Heide, N. Provatoroff, P. C. Traas, P. J. de Valois, H. J. Wobben y R. Tummer en *Parfums, cosmétiques, arômes*, n.º 3; mayo de 1985.

CHEMICAL REACTIONS IN PERFUME AGEING. J. H. Blakeway, M. L. Frey, S. Lacroix y M. Seu-Salerno en *Preprints of the XIVth IFSCC Congress*, vol. 2, pág. 245; Barcelona, 1986.

LA ENFERMEDAD DE LYME

LYME DISEASE: A TICK-BORNE SPIROCHETOSIS? Willy Burgdorfer, Alan G. Barbour, Stanley F. Hayes, Jorge L. Benach, Edgar Grunwald y Jeffrey P. Davis en *Science*, vol. 216, número 4552, págs. 1317-1319; 1982.

LYME DISEASE SPIROCHETES INDUCE HUMAN AND MURINE INTERLEUKIN-1 PRODUCTION. Gail S. Habicht, Gregory Beck, Jorge L. Benach, James L. Coleman y Kimberly D. Leichtling en *The Journal of Immunology*, vol. 134, n.º 5, págs. 3147-3154; mayo de 1985.

CHEMICAL AND BIOLOGIC CHARACTERIZATION OF A LIPOPOLYSACCHARIDE EXTRACTED FROM THE LYME DISEASE SPIROCHETE (*BORRELIA BURGDORFERI*). Gregory Beck, Gail S. Habicht, Jorge L. Benach y James L. Coleman en *The Journal of Infectious Diseases*, vol. 152, n.º 1, págs. 108-117; 1985.

FUSION NUCLEAR FRIA

MESIC MOLECULES AND MUON CATALYSED FUSION. L. Bracci y G. Fiorfentini en *Physics Reports*, vol. 152, número 4, págs. 169-216; 1982.

OBSERVATION OF UNEXPECTED DENSITY EFFECTS IN MUON-CATALYZED *D-T* FUSION. S. E. Jones, A. N. Anderson, A. J. Caffrey, C. DeW. Van Siclen, K. D. Watts, J. N. Bradbury, J. S. Cohen, P. A. M. Gram, M. Leon, H. R. Maltrud y M. A. Paciotti en *Physical Review Letters*, vol. 56, n.º 6, págs. 588-591; 1986.

DETUNING REDUCTION OF MUON STICKING IN RESONANT MUON-CATALYZED *D-T* FUSION. Michael Danos, Berndt Müller y Johann Rafelski en *Physical Review A*, vol. 34, n.º 5, págs. 3642-3645; noviembre de 1986.

MUON-CATALYSED FUSION REVISITED. Steven Earl Jones en *Nature*, vol. 321, n.º 6066, págs. 127-133; 8 de mayo de 1987.

AERODINAMICA DE LA POLINIZACION EOLICA

LIFE IN MOVING FLUIDS: THE PHYSICAL BIOLOGY OF FLOW. Steven Vogel. Princeton University Press, 1983.

PALEOBOTANY AND THE EVOLUTION OF PLANTS. Wilson N. Stewart. Cambridge University Press, 1983.

THE MOTION OF WINDBORNE POLLEN GRAINS AROUND CONIFER OVULATE CONES: IMPLICATIONS ON WIND POLLINATION. Karl J. Niklas en *American Journal of Botany*, vol. 71, n.º 3, págs. 356-374; marzo de 1984.

ARCOS Y BOVEDAS DEL PROXIMO ORIENTE

ANCIENT EGYPTIAN MASONRY. Somers Clarke y R. Engelbach. Oxford University Press, 1930.

ARCHITECTURE FOR THE POOR. Hassan Fathy. University of Chicago Press, 1973.

DIGGING UP TELL JEMMEH. Gus W. Van Beek en *Archaeology*, vol. 36, n.º 1, págs. 12-19; 1983.

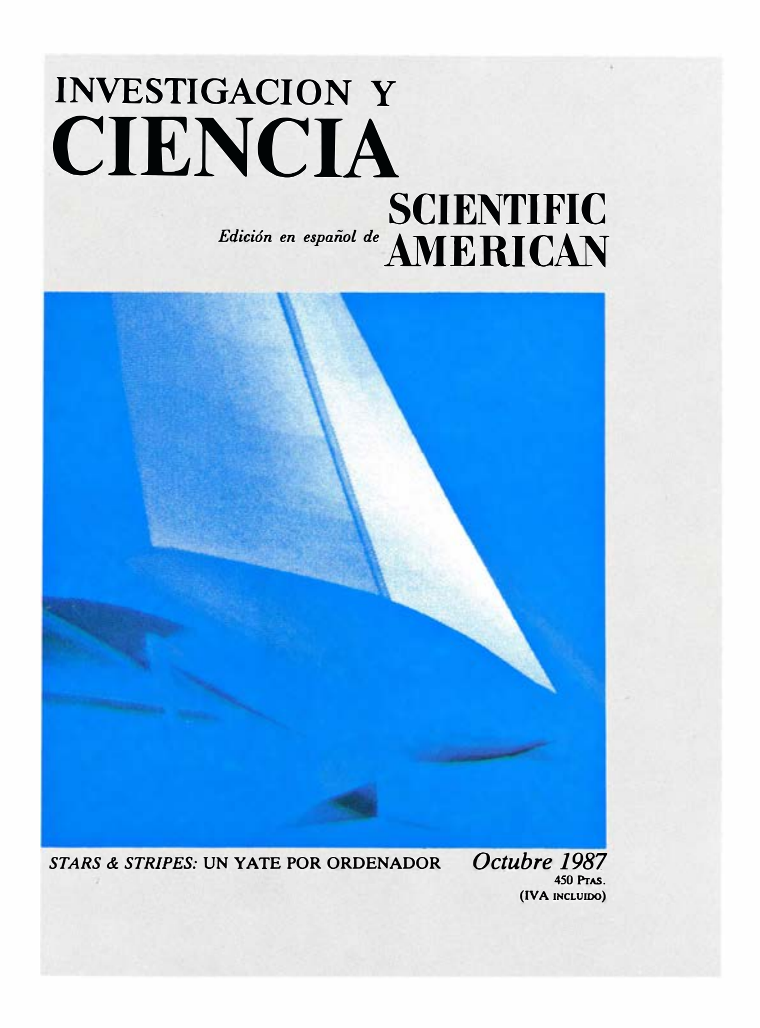
JUEGOS DE ORDENADOR

HENON MAPPING WITH PASCAL. Gordon Hughes en *Byte*, vol. 11, n.º 13, páginas 161-192; diciembre de 1986.

TALLER Y LABORATORIO

A NEW CONCEPT OF RENAL HEMODYNAMICS. W. J. Gatzek en *Medical Hypotheses*, vol. 4, n.º 3, págs. 221-230; mayo-junio de 1978.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



STARS & STRIPES, por John S. Letcher, Jr., John K. Marshall, James C. Oliver III y Nils Salvesen
La nave que ha ganado la Copa de América de 1987 constituye el fruto de un intenso esfuerzo técnico en el diseño de embarcaciones de vela.

COLISIONES ENTRE PROTONES CON ESPIN, por Alan D. Krish
El resultado de la colisión de dos protones muestra una sorprendente dependencia del sentido de sus espines, hasta el punto de poner en cuestión la teoría que describe la estructura y las fuerzas de esas partículas.

LAS CAUSAS DEL SINDROME DE DOWN, por David Patterson
Se están identificando y localizando en el cromosoma 21 los genes responsables de muchas de las alteraciones asociadas con esa patología.

LA TEORIA DE LA SELECCION CLONAL, por Gordon L. Ada y Sir Gustav Nossal
Los anticuerpos que defienden al organismo frente a las invasiones exteriores presentan una diversidad notable. Se ha tardado más de un siglo en definir con precisión la teoría que explica su génesis.

TRANSISTORES DE ARSENIURO DE GALIO, por William R. Frensley
Su enorme velocidad de respuesta se adecua a lo que exigen los nuevos ordenadores y sistemas de comunicación.

LA CAZA DE GACELAS EN LA SIRIA DE LA EDAD DE PIEDRA, por J. Legge y Peter A. Rowley-Conwy
Hace once mil años, una banda de cazadores-recolectores sedentarios empezó a sacrificar rebaños enteros de gacelas. La práctica persistió hasta mucho después de la aparición de la agricultura.

CONTAMINACION ATMOSFERICA POR PARTICULAS, por Robert N. Shaw
Se sabe que las partículas ácidas de la atmósfera reducen la visibilidad y dañan los materiales. Métodos ingeniosos han puesto de manifiesto que la principal fuente de partículas es la combustión de carburantes fósiles.

EVOLUCION DE LOS CROMOSOMAS *B*, por Manuel Ruiz Rejón, Carmelo Ruiz Rejón y José L. Oliver
Considerados durante mucho tiempo como accesorios, cada día se acumulan más pruebas en favor del carácter egoísta o parásito de los cromosomas B.

